T. POPA
A. BACIU
T. LASZLO

AVARII ÎN INSTALAȚIILE ENERGETICE

Cunoaşterea cauzelor şi a măsurilor de prevenire este esenţială în activitatea de combatere a defectării echipamentelor şi a producerii avariilor în sistemul energetic. Lucrarea face o prezentare sistematizată a acestui domeniu şi cuprinde elemente teoretice însoţite de exemplificări. La elaborarea materialului, care conţine numeroase referiri bibliografice, s-a ţinut seama atît de experienţa din ţara noastră cît şi din străinătate.

Lucrarea este structurată pe opt capitole şi tratează atît echipamentele şi instalaţiile mecanice din centralele termoelectrice cît şi echipamentele şi instalaţiile electrice din centralele şi reţelele electrice. Secţiunile referitoare la fiecare din cele două mari categorii de echipamente şi instalaţii cuprind succesiv, prezentarea avariilor (grupate în funcţie de locul apariţiei), analiza cauzelor avariilor şi a măsurilor de prevenire şi metodele de localizare şi remediere. Partea teoretică analizează natura fenomenelor şi prezintă cîteva elemente de calcul. Acestea sînt utilizate pentru exprimarea sintetică a factorilor care influenţează producerea fenomenelor analizate. Exemplele cuprind pe lîngă descrierea avariilor, materialul grafic şi tabelar necesar pentru înţelegerea expunerii.

Lucrarea se adresează personalului tehnico-inginerese, cadrelor didactice şi studenţilor din specialităţile energetică, electrotehnică şi construcţii de maşini termoenergetice, cărora le pune la dispoziţie o tratare unitară a domeniului avariilor din instalaţiile ramurei energiei electrice.

Control ştiinţific: ing. ALEXANDRU MIŞU
ing. CONSTANTIN VLĂDESCU

Redactor: ing. IOAN GANEA
Tehnoredactor: MARIA IONESCU
Coperta: SIMONA NICULESCU

Bun de tipar: 03.05.78. Coli de tipar: 21.
Tiraj: 5470+65 exemplare legate.
C.Z. 621.311.1.004.65

Întreprinderea poligrafică „Oltenia" Craiova
Str. Mihai Viteazul, nr. 4
Comanda nr. 45

PREFAŢĂ

Continuitatea alimentării cu energie electrică şi căldură este o cerinţă calitativă deosebit de importantă pusă activităţii duse în industria energiei electrice. De această cerinţă a cărei importanţă a fost subliniată de conducerea de partid şi de stat şi la consfătuirea cu activul din cercetare, din 30 sept. 1976, este legată necesitatea de funcţionare a echipamentelor energetice cu un număr cît mai redus de defecţiuni. Trebuie să fie subliniat faptul că o fiabilitate redusă a echipamentelor nu se reflectă numai în pagube la consumatori. Aceasta impune şi o creştere a cheltuielilor de investiţii în scopul instalării rezervelor suplimentare necesare în instalaţii, pentru a asigura continuitatea în alimentarea consumatorilor.

Activitatea de prevenire a defecţiunilor şi a avariilor trebuie dusă în mod sistematic. În acest scop este necesară cunoaşterea cauzelor şi modului de dezvoltare a defecţiunilor. Prin prezenta lucrare autorii îşi propun să descrie principalele tipuri de avarii şi defecţiuni în industria energiei electrice şi să analizeze cauzele lor. Analiza cuprinde atît elemente teoretice cît şi exemple de avarii şi defecţiuni pentru ilustrarea principiilor expuse. Lucrarea cuprinde şi cîteva elemente de calcul, care au ca scop numai o prezentare sintetică a factorilor, care influenţează producerea unor fenomene. Consideraţiile privind cauzele avariilor sînt completate cu descrierea unor metode de localizare şi prevenire a acestora.

Conţinutul lucrării a fost grupat după specificul echipamentelor şi instalaţiilor analizate în două secţiuni cu caracter mecanic şi respectiv electric.

Capitolul 1 (generalităţi) defineşte noţiunile folosite şi prezintă problemele de interes general, pentru toate categoriile de instalaţii: metodele de analiză individuală şi globală, utilizarea sistemelor informaţionale, efectele interconectării asupra creşterii gradului de siguranţă. Capitolul 2 cuprinde o enunţare succintă a tipurilor de avarii, grupate pe categorii de echipamente termoenergetice. Modul de producere a defecţiunilor la aceste echipamente este descris în detaliu în capitolul 3, pe tipuri de cauze. Se prezintă aspectele fizice şi chimice ale fenomenelor analizate, însoţite de exemple de defecţiuni, pentru ilustrarea consideraţiilor cu caracter general, care le preced. Capitolul cuprinde şi elemente de calcul, cu scopul de a preciza diferiţi factori,

care influențează fenomenele și de a furniza unele informații de natură cantitativă. Elementele de calcul sînt limitate la scopurile enunțate și nu constituie un îndrumător. În capitolul 4 se prezintă cîteva posibilități de localizare a defecțiunilor în echipamentele termoenergetice. Și aici sînt descrise pentru exemplificare cîteva cazuri semnificative.

Capitolul 5 prezintă avariile caracteristice instalațiilor electrice, grupate în funcție de locul apariției: în liniile electrice aeriene sau subterane, în stațiile de transformare și de conexiuni, în transformatoare și generatoare. Un punct special tratează avariile de sistem. Capitolul 6 analizează condițiile de producere a avariilor din instalațiile electrice și tehnica prevenirii acestora. În capitolul 7 se prezintă metodele moderne de localizare și de remediere a avariilor din instalațiile electrice. În încheiere capitolul 8 prezintă principiile pe care se bazează măsurile pentru limitarea efectelor avariilor.

În lucrare se utilizează sistemul de unități de măsură internațional, însă diagramele și tabelele preluate din literatură, cuprind elementele cantitative exprimate în sistemul de unități de măsură în care au apărut în lucrările originale.

Lucrarea a fost elaborată sub coordonarea dr. ing. Teodor Popa, contribuția autorilor fiind următoarea:

— *ing. Anibal Baciu: cap.1; subcap. 5.3—5.6, 6.3—6.6, 7.3—7.6, 8.1;*
— *dr.ing. Teodor Popa: cap. 2, 3 și 4;*
— *dr.ing. Toma Laszlo: subcap. 5.1, 5.2, 6.1, 6.2, 7.1, 7.2, 8.2 și 8.3.*

AUTORII

CUPRINS

1. Generalități 9

1.1. Definiții 11
1.2. Analiza și cercetarea individuală a incidentelor de exploatare 12
1.3. Analiza și cercetarea globală a incidentelor de exploatare. Indici specifici . 13
1.4. Efectele interconectării sistemelor electroenergetice naționale asupra gradului de siguranță 15
1.5. Sistemul informațional GETIC 16

Bibliografie 18

2. **Avarii caracteristice în instalațiile termomecanice ale centralelor electrice** . . 19

2.1. Avarii la cazane de abur 19
2.1.1. Sistemul de vaporizare 19
2.1.2. Supraîncălzitorul 21
2.1.3. Economizorul 22
2.1.4. Preîncălzitorul de aer 22
2.1.5. Focare 23
2.2. Avarii la conducte 23
2.3. Avarii la turbine cu abur 24
2.3.1. Carcasele turbinelor cu abur 24
2.3.2. Rotoare 25
2.4. Avarii la aparate schimbătoare de căldură 26
2.5. Avarii la echipamente auxiliare 27
2.5.1. Pompele de alimentare. 27
2.5.2. Ventilatoarele de gaze 27
2.5.3. Morile de cărbune 28

Bibliografie 28

3. **Modul de producere și măsuri de prevenire a principalelor tipuri de avarii în instalațiile termomecanice ale centralelor electrice** 29

3.1. Depășirea solicitărilor și jocurilor admisibile 29
3.1.1. Solicitări în echipamentele termomecanice 29
3.1.2. Factorii determinanți ai solicitărilor 30
3.1.3. Schema de calcul al solicitărilor în echipamentele termomecanice . 43

3.1.4. Elemente de calcul . . . 46
3.1.5. Avarii produse de depăşirea solicitărilor limită . . . 64
3.1.6. Depăşirea jocurilor admisibile . . . 96
3.2. Acţiunea mediilor de lucru . . . 101
3.2.1. Coroziunea interioară . . . 101
3.2.2. Coroziunea exterioară . . . 121
3.2.3. Eroziunea prin cenuşă zburătoare . . . 125
3.2.4. Eroziunea prin jet sau picături de apă . . . 128
Bibliografie . . . 130

4. Localizarea unor defecţiuni în echipamentele termomecanice ale centralelor electrice . . . 136
4.1. Modificarea vibraţiilor . . . 136
4.2. Modificarea performanţelor turbinei şi parametrilor aburului . . . 145
4.3. Modificarea proprietăţilor materialului . . . 154
4.4. Defectoscopie . . . 161
4.4.1. Endoscopia . . . 161
4.4.2. Defectoscopia cu ultrasunete . . . 162
4.4.3. Amprente metalografice . . . 163
4.5. Aparate de control ale eforturilor în echipamente . . . 163
Bibliografie . . . 166

5. Avarii caracteristice ale instalaţiilor electrice . . . 168
5.1. Avariile liniilor electrice aeriene . . . 168
5.1.1. Deteriorările conductoarelor şi clemelor de legătură . . . 168
5.1.2. Deteriorările izolatoarelor şi ale pieselor anexe . . . 171
5.1.3. Deteriorările stîlpilor şi fundaţiilor . . . 175
5.2. Avariile liniilor electrice subterane . . . 177
5.2.1. Deteriorări în cablul propriu-zis . . . 177
5.2.2. Deteriorări în zona manşoanelor de legătură sau a cutiilor terminale . . . 180
5.3. Avarii caracteristice ale staţiilor de transformare şi de conexiune . . . 185
5.3.1. Avarii în comutaţia primară . . . 185
5.3.2. Avarii în comutaţia secundară . . . 188
5.4. Avarii caracteristice ale transformatoarelor . . . 191
5.4.1. Avarii la bobinaje . . . 191
5.4.2. Avarii la miezul magnetic . . . 193
5.4.3. Avarii la comutatoarele de ploturi . . . 194
5.4.4. Avarii la cuve . . . 195
5.5. Avarii caracteristice ale generatoarelor . . . 196
5.5.1. Avarii la fundaţii . . . 196
5.5.2. Avarii la carcase . . . 197
5.5.3. Avarii la statoare . . . 197
5.5.4. Avarii la rotoare . . . 199
5.6. Avarii caracteristice ale sistemului energetic . . . 202
5.6.1. Stările sistemului energetic . . . 202
5.6.2. Stabilitatea dinamică . . . 203
5.6.3. Stabilitatea statică . . . 205
5.6.4. Avarii ale sistemelor energetice . . . 206
5.6.5. Măsuri pentru prevenirea şi limitarea efectelor avariilor de sistem . . . 210
Bibliografie . . . 212

6. Condiţii de producere şi tehnica prevenirii avariilor din instalaţiile electrice . . . 214
6.1. Regimuri normale de funcţionare . . . 214
6.2. Condiţii de suprasolicitări electrice . . . 215
6.3. Condiţii de suprasolicitări termice . . . 221
6.4. Suprasolicitări mecanice . . . 225
6.4.1. Instabilitatea terenului . . . 225
6.4.2. Lovituri mecanice . . . 226
6.4.3. Acţiuni ale variaţiilor de temperatură, date de mediul ambiant . . . 227
6.4.4. Acţiuni ale intensităţii vîntului . . . 227
6.4.5. Acţiuni ale depunerilor de chiciură . . . 230
6.4.6. Prevederi de calcul pentru evitarea acţiunii diferenţei de temperatură, a vitezei vîntului şi a depunerilor de chiciură . . . 231
6.5. Alte acţiuni exterioare (poluare, coroziune, personal) . . . 233
6.5.1. Poluarea izolaţiei electrice . . . 233
6.5.2. Coroziunea instalaţiilor electrice . . . 236
6.5.3. Exemple de poluare şi coroziune ale instalaţiilor electrice şi măsurile luate . . . 241
6.5.4. Mecanizarea lucrărilor de spălare şi de ungere cu unsoare a izolaţiei electrice . . . 242
6.5.5. Acţiunile greşite ale personalului . . . 245
6.6. Mentenanţa instalaţiilor electrice . . . 249
6.6.1. Exploatarea şi întreţinerea-repararea instalaţiilor electrice . . . 249
6.6.2. Principalele probe şi încercări ale izolaţiei electrice . . . 251
6.6.3. Măsurarea rezistenţei de izolaţie şi a coeficientului de absorbţie . . . 251
6.6.4. Măsurarea tangentei unghiului de pierderi în dielectric . . . 255
6.6.5. Măsurarea capacităţii de izolaţie . . . 258
6.6.6. Măsurarea nivelului descărcărilor parţiale . . . 259
6.6.7. Încercarea cu tensiune mărită . . . 263
6.6.8. Încercarea izolaţiei cu tensiune de impuls . . . 263
Bibliografie . . . 267

7. Metode moderne de localizare şi de remediere a defectelor din instalaţiile electrice . . . 269
7.1. Metode de localizare şi de remediere a defectelor din liniile electrice aeriene . . . 269
7.1.1. Localizarea şi remedierea preventivă a defectelor în liniile electrice aeriene . . . 269
7.1.2. Localizarea şi remedierea defectelor în cazuri de avarii, în liniile electrice aeriene . . . 273
7.2. Metode de localizare şi de remediere a defectelor în liniile electrice subterane . . . 284
7.2.1. Localizarea şi remedierea preventivă a defectelor în liniile electrice subterane . . . 284
7.2.2. Localizarea şi remedierea defectelor în cazuri de avarii în liniile electrice subterane . . . 289

7.3. Metode moderne de localizare și prevenire a avariilor în stațiile de transformare și de conexiune 298
7.3.1. Calculatoarele de proces 298
7.3.2. Aparate de înregistrare fenomenelor 298
7.3.3. Măsuri pentru evitarea efectelor principalelor fenomene tranzitorii și staționare 303
7.3.4. Măsuri pentru controlul temperaturii contactelor electrice 305
7.4. Metode de localizare și prevenire a avarierii transformatoarelor 307
7.4.1. Tipuri constructive de transformatoare 307
7.4.2. Fenomenul de îmbătrînire a izolației solide și a uleiurilor electroizolante 307
7.4.3. Măsuri de prevenire a îmbătrînirii premature a izolației transformatoarelor 308
7.4.4. Măsuri de limitare a efectelor unei eventuale incendieri de transformator 311
7.5. Metode moderne de localizare și prevenire a avarierii generatoarelor . . . 311
7.5.1. Sisteme de răcire a generatoarelor 312
7.5.2. Vibrații și zgomote 313
7.5.3. Urmărirea degradării izolației prin metoda fizico-chimică 314
7.6. Organizarea intervențiilor în rețelele electrice 315
7.6.1. Locul de anunțare a incidentelor și deranjamentelor 316
7.6.2. Sisteme de preluare a anunțurilor 316
7.6.3. Sisteme de organizare a echipelor de intervenție 316
7.6.4. Sfera de activitate a echipelor de intervenție 317
7.6.5. Dotarea tehnică a echipelor de intervenție 317
Bibliografie 323

8. Măsuri pentru limitarea efectelor avariilor 324

8.1. Alegerea corespunzătoare a schemelor 324
8.1.1. Clase de consumatori, niveluri de rezervare și categorii de receptoare de energie electrică 324
8.1.2. Tipuri de scheme ale stațiilor de transformare și de conexiune . . 326
8.1.3. Tipuri de scheme ale rețelelor electrice 329
8.2. Protecții și automatizări 332
8.2.1. Protecția prin relee 332
8.2.2. Rolul automatizărilor 334
8.3. Sisteme de comandă și de supraveghere centralizată 335
Bibliografie 336

1. GENERALITĂȚI

Un *sistem electroenergetic* este format din centrale electrice (cu condensație, de termoficare, hidroelectrice etc.), rețele electrice și rețele de termoficare alimentate din aceste centrale, precum și din instalațiile consumatoare (receptoare) de energie electrică, respectiv de căldură livrată din centralele de termoficare [1.1].

Obiectivul prioritar al unui sistem electroenergetic îl reprezintă asigurarea cu energie electrică, respectiv cu căldură livrată din centrale de termoficare a tuturor categoriilor de consumatori, în condiții de siguranță și economicitate.

Parametrii de calitate ai energiei electrice și ai căldurii furnizate consumatorilor sînt :

— continuitatea sau gradul de satisfacere cu energie electrică respectiv căldură, a consumatorilor ;

— nivelul tensiunii și al frecvenței, pentru energia electrică livrată ;

— nivelul presiunii și al temperaturii, precum și puritatea agentului purtător, pentru căldura livrată din centrale de termoficare.

Sub aspectul parametrilor de calitate, există o strînsă interdependență între instalațiile furnizoare și cele receptoare de energie. Pe deoparte instalațiile furnizoare sînt cu atît mai costisitoare, cu cît asigură o calitate mai bună a energiei, iar pe de altă parte receptoarele consumatorilor sînt cu atît mai scumpe cu cît admit o variație mai largă a parametrilor la care preiau energia [1.2]. Între gradul de imperfecție a energiei electrice sau a căldurii furnizate P și cheltuielile suplimentare pentru construirea și exploatarea instalațiilor de furnizare, respectiv a acelor consumatoare de energie electrică sau căldură I, trebuie căutat un optim, reprezentat prin suma minimă a cheltuielilor pentru cele două genuri de instalații. Acest optim este exprimat grafic în fig 1.1, în care curba a reprezintă cheltuielile suplimentare pentru construirea și exploatarea instalațiilor furnizoare, iar curba b cheltuielile suplimentare în instalațiile receptoare ale consumatorilor, generate de imperfecțiunea calității energiei electrice sau căldurii. Optimul se găsește în punctul în care suma celor

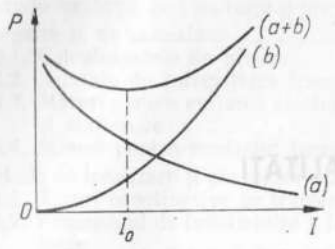


Fig. 1.1. Relaţia dintre gradul de imperfecţie a calităţii energiei electrice sau căldurii şi cheltuielile suplimentare de investiţii şi exploatare.

două categorii de cheltuieli, reprezentată prin curba $a + b$, va avea valoarea minimă. El corespunde unui *grad de imperfecţie* I_0.

Pagubele produse industriei în cazul unor întreruperi în alimentarea cu energie electrică sau cu căldură sînt mari. Astfel, luînd mediile ponderate ale daunelor [1.3] şi utilizînd metodele de calcul ale daunelor [1.4], în tabelul 1.1 se arată pentru cîteva produse principale ale industriei chimice, care este producţia nerealizată, la o întrerupere în alimentarea cu energie electrică de 10 min.

Valorile din tabelul 1.1 depind în mare măsură de tipul instalaţiilor receptoare, de rezerva tampon de materii prime, precum şi de faptul dacă întreruperea în alimentarea cu energie electrică a fost însoţită sau nu de deteriorări de utilaje.

Tabelul 1.1

Daunele provocate în industria chimică de o întrerupere de 10 min în alimentarea cu energie electrică

Produsul	Daune	
	t	mii lei
Benzină	133–561	53,4–233,6
Toluen	42– 51	22,9– 26,7
Ortoxilen	3– 4,9	2,8– 2,9
Etilenă	59–288	137,6–510,3
Polietilenă	63–175	89,4–578,2
Negru de fum	17	56,2

Necesitatea obiectivă a limitării la minimum a perturbaţiilor de orice natură în funcţionarea unui sistem electroenergetic a condus la analiza ştiinţifică şi statistică a numărului, cauzelor, duratelor şi consecinţelor unor eventuale apariţii de evenimente nedorite şi în special a întreruperilor în alimentarea cu energie electrică sau căldură.

1.1. DEFINIŢII

Se numeşte *incident de exploatare* evenimentul sau succesiunea de evenimente care conduc la modificarea stării anterioare de exploatare, cu consecinţe nedorite asupra duratei de funcţionare sau parametrilor funcţionali, care au loc la un moment dat într-un element sau într-o instalaţie, indiferent dacă au avut sau nu consecinţe asupra consumatorilor [1.5].

Din incidentele de exploatare fac parte:

— ieşirile sau scoaterile accidentale din funcţiune a unei sau a mai multor instalaţii componente ale centralelor electrice (ca de ex.: cazane, turbine, generatoare, instalaţii de combustibil, circuit hidrotehnic, staţii de reducere — răcire, captări, prize, castel de echilibru, conductă forţată ş.a.) sau a reţelelor electrice (ca de ex.: elemente ale staţiilor de transformare, posturilor de transformare, ale liniilor electrice aeriene sau în cablu subteran ş.a.);

— existenţa unor pierderi de apă în afara limitelor stabilite la centralele hidroelectrice, care determină reducerea energiei electrice productibile;

— reducerea faţă de program a puterii efectiv utilizabile a unei centrale, provocată de orice circumstanţe, sub o limită şi peste o durată prestabilite.

Din punctul de vedere al consecinţelor asupra instalaţiilor furnizoare propriu-zise sau asupra consumatorilor, incidentele de exploatare pot fi de următoarele genuri:

— *avarie*, care reprezintă un incident de exploatare sau o succesiune de incidente, care au loc la un moment dat într-un obiectiv, într-o zonă din sistem sau în sistemul energetic luat în asamblu şi care au drept consecinţe deteriorări de echipamente importante sau întreruperi în alimentarea cu energie electrică sau căldură a unei platforme industriale sau a unei zone de consum;

— *deteriorare de echipament*, apărută cu ocazia unui incident de exploatare (sau avarie) şi caracterizată prin modificarea caracteristicilor fizice (electrice, termice, hidraulice sau mecanice) ale echipamentului, care conduc la scoaterea acestuia din funcţiune, necesitînd trecerea în reparaţie;

— *perturbaţie în alimentarea cu energie electrică sau căldură*, totală sau parţială (limitarea), care se referă la necesitatea ca la un moment dat să se limiteze parţial sau total furnizarea de energie electrică sau căldură pentru unii consumatori importanţi.

În domeniul reţelelor electrice, noţiunea de incident de exploatare se utilizează în reţelele cu tensiuni de 1 kV şi mai mari. Pentru reţelele de joasă tensiune (0,4 kV), noţiunea utilizată este aceea de *deranjament*[1.6].

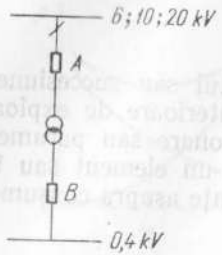


Fig. 1.2. Delimitarea între noțiunea de incident de exploatare și deranjament, în rețelele electrice.

Delimitarea fizică între noțiunile de incident și deranjament se concretizează în posturile de transformare (fig. 1.2.). Astfel, indiferent de natura declanșării sau cauza care a provocat declanșarea intempestivă a întreruptorului *A* de medie tensiune (sau topirea siguranțelor de medie tensiune echivalente) sau a elementelor din amonte de acesta, modificarea nedorită a schemei normale de funcționare se încadrează ca *incident*. Se exceptează cazurile cînd instalațiile de automatizare (reanclanșare automată rapidă sau anclanșarea automată a rezervei) funcționează corect la un defect pasager.

Indiferent de natura sau cauza care a provocat declanșarea întreruptorului *B* de 0,4 kV (sau topirea siguranțelor de joasă tensiune echivalente) ori a altor elemente din aval de acesta, modificarea nedorită a schemei normale de funcționare se încadrează ca *deranjament*. Și de această dată se exceptează cazurile în care instalațiile de automatizare funcționează corect, la un defect pasager.

Atît incidentele de exploatare, cît și deranjamentele se caracterizează prin următoarele elemente principale:

— *cauza* este deficiența sau fenomenul care provoacă la un moment dat apariția incidentului sau deranjamentului (proiectare eronată, execuție greșită, mod incorect de exploatare sau întreținere, uzură tehnică, depășirea solicitărilor pentru care a fost dimensionată instalația ș.a.);

— *prilejul* este împrejurarea momentană în care o anumită cauză provoacă incidentul (manifestări ale naturii, poluarea, vibrații, influențe exterioare, manevre de exploatare, abateri de la parametrii nominali ș.a.);

— *durata* este intervalul de timp cuprins între momentul apariției incidentului și momentul lichidării lui;

— *energia electrică sau căldura nelivrabilă* este energia electrică sau căldura care ar fi fost livrate consumatorilor în condiții normale de funcționare.

1.2. ANALIZA ȘI CERCETAREA INDIVIDUALĂ A INCIDENTELOR DE EXPLOATARE

Fiecare incident de exploatare este analizat sistematic, din toate punctele de vedere, întocmindu-se pentru fiecare caz o *fișă de incident*. Analiza individuală a fiecărui incident se efectuează de o comisie, care

completează totodată și fișa de incident. În fișă se înscriu principalele evenimente care au avut loc, condițiile meteorologice, datele calendaristice, datele instalației sau elementului afectat, cauza, prilejul, durata, efectele asupra consumatorilor, funcționarea dispozitivelor de protecție, de automatizare de protecție la supratensiuni, ale dispozitivelor de automatizare hidro și termomecanice, schema instalațiilor afectate și măsurile de luat pentru prevenirea altor incidente similare.

Fișa de avarie cuprinde: date calendaristice, numărul de incidente componente, descrierea incidentului primar și a incidentelor asociate, descrierea desfășurării avariei, consecințele și măsurile propuse de prevenire pentru viitor.

Fișa de echipament deteriorat cuprinde: descrierea pe scurt a fenomenului și a elementului deteriorat, parametrii nominali ai instalațiilor și elementului deteriorat, datele constructive ale echipamentului deteriorat, durata de funcționare totală de la ultima reparație și de la ultima încercare profilactică, rezultatele ultimei încercări profilactice, cauza deteriorării, durata indisponibilității, costul reparațiilor accidentale, numărul de echipamente identice deteriorate, măsuri de prevenire pentru viitor.

Fișa de perturbări în alimentarea cu energie electrică sau căldură a consumatorilor importanți nominalizați, fiecare consumator avînd fișa lui, cuprinde o înșiruire a evenimentelor cu date caracteristice privind: datele calendaristice, energie electrică sau căldură nelivrabilă, abateri de la parametrii nominali, cauzele și consecințele perturbării.

Rezultă că în funcție de gravitatea și consecințele unui incident de exploatare, se pot întocmi fie numai fișa de incident, fie fișa de incident asociată cu fișa de avarie, fie chiar toate cele trei fișe prezentate mai sus.

În toate fișele, elementele principale sînt codificate.

1.3. ANALIZA ȘI CERCETAREA GLOBALĂ A INCIDENTELOR DE EXPLOATARE. INDICI SPECIFICI

Avînd la dispoziție fișele individuale de analiză a incidentelor de exploatare, a avariilor, a echipamentelor deteriorate, a perturbărilor în alimentarea cu energie electrică sau căldură a consumatorilor importanți nominalizați (fișe codificate) și utilizînd metode de prelucrare automată a datelor, se pot întocmi analize globale de incidente pe o anumită perioadă (de obicei un an).

Astfel, se pot scoate în evidență indici specifici, pornind de la cei cu caracter general, cum sînt: număr de incidente raportate la 100 km instalați și perioadă, pînă la indici specifici de detaliu, cum ar fi: numărul

de izolatoare deteriorate, de un anumit tip și fabricație, raportat la numărul total de acest gen existent în instalații.

Se redau mai jos cîțiva indici specifici anuali, rezultați în cîteva țări [1.7]:
— la linii electrice aeriene de 1—400 kV, indicele specific de incidente a fost de 13,4 în Austria în 1968, de 12,7 în Anglia în 1970 și de 14,2 în R. F. Germania în 1967, la 100 km linie și an;
— la linii electrice aeriene de 1—25 kV, indicele specific de incidente a fost de 13,4 în Franța în 1970, la 100 km linie și an;
— la linii electrice aeriene de 35—110 kV, indicele specific de incidente a fost 3,5 în Suedia în 1966, 10,3 în Austria în 1966 și 10,8 în Belgia în 1965, la 100 km linie și an;
— la linii electrice aeriene de 400—500 kV, indicele specific de incidente mediu anual pe perioada 1965—1970 a fost în U.R.S.S. de 0,815, la 100 km linie.

Indici specifici cei mai larg utilizați sînt:

— *indici specifici de incidente:*

$$I_1 = \frac{N \times 100}{L \text{ sau } Ni}, \quad I_2 = \frac{D \times 100}{L \text{ sau } Ni}; \tag{1.1}$$

— *indici specifici de incidente cu întreruperi* în alimentarea consumatorilor:

$$I_3 = \frac{Nc \times 100}{L \text{ sau } Ni}, \quad I_4 = \frac{Dc \times 100}{L \text{ sau } Ni}; \tag{1.2}$$

— *indici specifici de incidente cu deteriorări* de echipamente:

$$I_5 = \frac{Nd \times 100}{L \text{ sau } Ni}; \tag{1.3}$$

— *indici specifici de deteriorări:*

$$D_1 = \frac{Nd \times 100}{L \text{ sau } Ne}, \quad D_2 = \frac{Dd \times 100}{L \text{ sau } Ne}, \tag{1.4}$$

unde: N este numărul total de incidente; Nc — numărul de incidente care au condus la întreruperea alimentării consumatorilor; Nd — numărul de incidente care au condus la deteriorări de echipamente; D — durata totală a incidentelor (în ore); Dc — durata incidentelor care au condus la întreruperi în alimentarea consumatorilor (în ore); Dd — durata indisponibilităților echipamentelor deteriorate (în ore); L — lungimea rețelei electrice aeriene sau subterane (în km); Ni — numărul instalațiilor de același tip în funcțiune (buc); Ne — numărul de echipamente de același tip montate (buc).

Indicele specific cel mai corespunzător este *gradul de satisfacere a alimentării consumatorilor cu energie electrică C*, în punctul de delimitare al instalațiilor între furnizor și consumator și care este definit prin formula:

$$C = \frac{Te - Tn}{Te} \times 100, \tag{1.5}$$

unde: Te este intervalul de timp în cadrul unui an calendaristic, în care consumatorul solicită criteriul de siguranță; Tn — durata probabilă de nealimentare, în perioada considerată.

Înlocuind în formula (1.5) duratele T cu energia electrică, se obține de fapt gradul de siguranță G, definit de relația:

$$G = \frac{E - En}{E} \times 100, \tag{1.6}$$

unde: E reprezintă energia electrică livrată într-un an consumatorului; En energia electrică nelivrabilă într-un an consumatorului, ca urmare a întreruperilor.

1.4. EFECTELE INTERCONECTĂRII SISTEMELOR ELECTROENERGETICE NAȚIONALE ASUPRA GRADULUI DE SIGURANȚĂ

Interconectarea sistemelor electroenergetice ale țărilor vecine prezintă importante avantaje reciproce, în special în ceea ce privește creșterea gradului de siguranță în funcționare.

În fig. 1.3 se arată un exemplu ipotetic de interconectare între sistemul electroenergetic al unei țări, cu sistemele electroenergetice ale țărilor vecine.

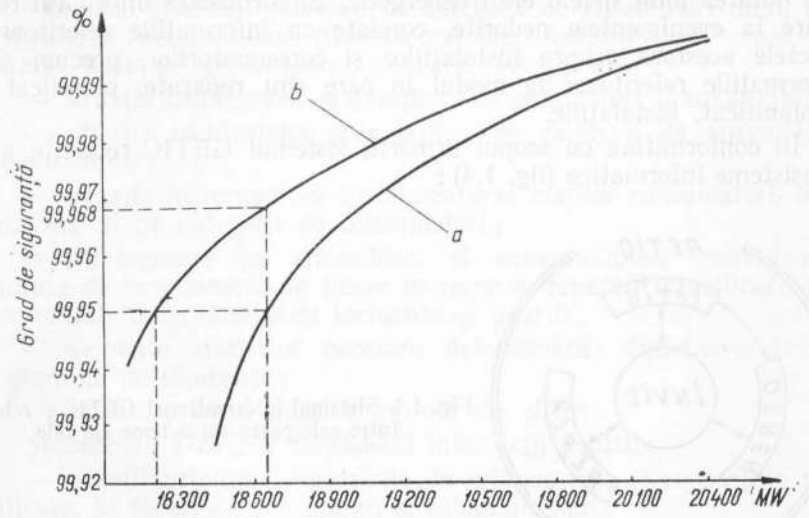


Fig. 1.3. Variația gradului de siguranță, în funcție de puterea în centrale, pentru diferite ipoteze de interconexiune.

Considerînd că sistemul electroenergetic al țării respective are o putere efectiv disponibilă indicată în abscisă, în ipoteza de interconectare cu țările vecine prin două linii capabile să transporte fiecare cîte 900 MW și avînd în ordonată variația gradului de siguranță, rezultă curba *a* din diagramă. Dacă interconexiunea se realizează și printr-o a treia linie capabilă să transporte 2 400 MW, gradul de siguranță variază după curba *b*.

Pornind de la o putere instalată de 18 700 MW, se constată că în primul caz (curba *a*) gradul de siguranță este de 99,95% iar în a doua ipoteză (curba *b*), de 99,968%.

Cu alte cuvinte, pentru a menține același grad de siguranță de 99,95% și în varianta *b*, este suficient să existe în țara respectivă o putere efectiv disponibilă de cca. 18 200 MW, ceea ce ar însemna față de prima alternativă nemontarea și deci economisirea a cca 500 MW din puterea efectiv instalată în centralele electrice.

Este evident că în afara celor precizate mai sus interconexiunea între sistemele electroenergetice ale țărilor mai prezintă și alte avantaje: reducerea puterii în centrale datorită diferențelor de fus orar, micșorarea pierderilor în rețelele electrice, precum și reducerea puterii instalate în centralele electrice.

1.5. SISTEMUL INFORMAȚIONAL GETIC

Sistemul informațional GETIC reprezintă un sistem integrat de tratare a informațiilor privind comportarea în funcționare a instalațiilor din dotarea unui sistem electroenergetic. El furnizează informații referitoare la evenimentele nedorite, corelate cu informațiile referitoare la efectele acestora asupra instalațiilor și consumatorilor, precum și cu informațiile referitoare la modul în care sînt reparate, planificat sau neplanificat, instalațiile.

În conformitate cu scopul urmărit, sistemul GETIC reunește patru subsisteme informatice (fig. 1.4):

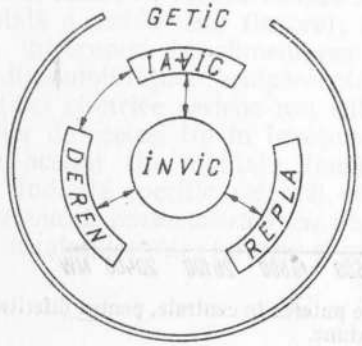


Fig. 1.4. Sistemul informațional GETIC și relațiile între cele patru subsisteme ale sale.

— subsistemul INVIC — Gestiunea Mișcărilor din Inventarul Instalațiilor și Consumatorilor;

— subsistemul IAVIC — Gestiunea Incidentelor, Avariilor și Întreruperilor Accidentale a Consumatorilor;

— subsistemul DEREN — Gestiunea Deteriorărilor de Echipamente și a Reparațiilor Neplanificate;

— subsistemul REPLA — Gestiunea Reparațiilor Planificate.

Fiecare subsistem informațional colectează informațiile primare pe documente separate, organizate astfel, încît să se evite colectarea în paralel a informațiilor comune, necesare mai multor subsisteme.

Subsistemul INVIC pune la dispoziție următoarele genuri de informații:

— dotarea și caracteristicile tehnico-economice-funcționale ale instalațiilor;

— caracteristicile tehnico-funcționale ale consumatorilor;

— funcționarea normală și utilizarea capacităților în alimentarea consumatorilor;

— calitatea alimentării consumatorilor;

— gradul de siguranță în funcționare a instalațiilor, rezultînd din activitățile de proiectare, construcții-montaj, fabricația echipamentelor, exploatarea și repararea acestora;

— statistica dezvoltării instalațiilor.

Subsistemul IAVIC pune la dispoziție următoarele genuri de informații:

— indicii specifici, calculați pe categorii de ansambluri (linii, stații, centrale) și subansambluri (transformatoare, întreruptoare, separatoare, cazane, turbine, generatoare, motoare, pompe ș.a.);

— situația incidentelor și avariilor, pe ansambluri și subansambluri;

— situația incidentelor și avariilor, pe categorii de ansambluri și subansambluri;

— situația întreruperilor în alimentarea marilor consumatori, individualizați și pe categorii de consumatori;

— istoriograme pe ansambluri și subansambluri individualizate (durate de funcționare, de ținere în rezervă, reparații planificate, indisponibilități determinate de incidente și avarii);

— elemente statistice necesare determinării statistico-matematice a gradului de siguranță;

— analiza privind avariile extinse de sistem.

Subsistemul DEREN furnizează informații pentru:

— situații privind deteriorările de echipamente și reparațiile neplanificate, pe tipuri de ansambluri și subansambluri;

— situații pe ansambluri și subansambluri individualizate, privind deteriorările de echipamente și reparațiile neplanificate;

— indicii de deteriorare, calculaţi pe tipuri de subansambluri ;
— elemente statistice pentru stabilirea stocurilor de securitate.

Subsistemul REPLA furnizează informaţii privind datele caracteristice tehnice şi economice ale reparaţiilor planificate ale instalaţiilor, pe ansambluri şi subansambluri.

BIBLIOGRAFIE

1.1. *Statutul privind funcţionarea sistemului energetic naţional şi disciplina lucrătorilor din acest sistem* — Decretul nr. 202/1974.

1.2. Iacobescu, G., Popescu, S., Baciu, A. şi Ciamba, A. *Controlul calităţii lucrărilor în energetică*. Editura didactică şi pedagogică, 1976.

1.3. Chapouille, P., R. de Pazzis. *Fiabilité des systèmes*, 1968.

1.4. Mihailov, V. V. *Nadejnosti electrosnabjenia promîşlenîh predpriatii*. Editura Energhia, Moscova, 1973.

1.5. *Regulamentul pentru analiza şi evidenţa incidentelor şi avariilor în instalaţiile de producere, transport şi distribuţie a energiei electrice şi a căldurii*. MEE, ODE, 1973.

1.6. Baciu, A. *Soluţii moderne de remediere a deranjamentelor la consumatorii de energie electrică în reţelele electrice urbane*. MEE, ODE, 1973.

1.7. Baciu, A. *Măsuri preventive luate pentru reducerea numărului de incidente şi deranjamente în reţelele electrice*. Simpozion CNST şi MEE, Suceava, 1975.

2. AVARII CARACTERISTICE ÎN INSTALAŢIILE TERMOMECANICE ALE CENTRALELOR ELECTRICE

În acest capitol sînt enumerate tipurile de avarii produse în instalaţiile termomecanice şi cauzele lor. Cauzele defecţiunilor produse în echipamente diferite (de ex. cazan, turbină) şi în componente diferite ale aceluiaşi echipament (de ex. : tambur, colectoare, ţevi, la cazane) sînt de multe ori de aceeaşi natură. Aspectele fenomenologice ale acestor cauze sînt tratate în cap. 3. De asemenea, cap. 2 are scopul de a prezenta o imagine de ansamblu a defecţiunilor, grupate pe tipuri de echipamente, precum şi a formelor de manifestare, cu indicarea fenomenelor care le generează.

2.1. AVARII LA CAZANE DE ABUR

2.1.1. Sistemul de vaporizare

În tambure, butelii de pornire şi colectoare pot să apară fisuri care sînt o consecinţă a regimului de funcţionare. În timpul pornirilor şi opririlor, se produc variaţii de temperatură care sînt la originea solicitării alternate a materialului. Mărimea solicitării depinde de viteza de variaţie a temperaturii. În acest sens, şocurile termice au un efect accentuat de obosire a materialului, manifestat mai ales la buteliile de pornire ale cazanelor cu străbatere forţată. Fisurile se produc de obicei în zonele concentratoare de tensiuni şi anume la marginea orificiilor, în zonele de ovalitate mare, respectiv cu rază mică de curbură, în zonele cu defecte de prelucrare, cu tensiuni interne provenite din timpul procesului de sudură sau la îmbinări între elemente cu pereţi de grosimi diferite. Dezvoltarea fisurilor este favorizată de fenomenul de coroziune sub tensiune alternată, ca urmare a deteriorării stratului protector de magnetită de

pe suprafața metalului. Coroziunea continuă și în perioadele de oprire. a instalației. Fisurile apar cu precădere în zonele materialului cu capacitate redusă de deformație plastică.

Solicitarea alternată se produce nu numai în cursul pornirilor și opririlor. Spargerea unei țevi de ecran, urmată de scăderea rapidă de presiune în sistemul de vaporizare, produce și ea o solicitare termică foarte importantă. În general, avariile care determină efectuarea de reparații, urmate de o probă de presiune, sînt cauze de solicitare termică și mecanică mărită, prin șocul termic produs de apa introdusă în tambur pentru proba hidraulică și prin însăși efectuarea acestei probe. Astfel de avarii sînt de exemplu spargerile de țevi de economizor. Declanșările preîncălzitoarelor de înaltă presiune produc în mod direct șocuri termice în cazan.

De aceea, avariile, dacă sînt numeroase, constituie ele însele cauza unor noi defecțiuni. În general, modul de producere al defectelor este complex și este condiționat de interacțiunea mai multor factori de influență. Cercetarea cauzelor trebuie să cuprindă analize chimice, mecanice și metalografice ale materialului. Este necesar să se stabilească dacă fisurile sînt intercristaline sau transcristaline. De asemenea, trebuie stabilit caracterul static sau dinamic al solicitării care a produs fisura, precum și eventuala contribuție a coroziunii.

O serie de puncte slabe ale tamburelor provin din fabricație și anume ovalități, neregularități ale suprafeței, suduri netratate termic.

Țevile vaporizatoare sînt supuse unui efort termic nu numai în regim tranzitoriu, dar și în regim de funcționare continuă. Acest efort depinde de fluxul termic, deci de natura combustibilului și de poziția în focar a tronsonului respectiv de țeavă. Cele mai frecvente defecțiuni ale acestor țevi sînt cauzate în cazanele mari de abur de fenomene de coroziune sub tensiune, sub depunerile de oxizi de fier în zonele cu flux termic ridicat sau răcire insuficientă. La cazanele cu vaporizare în trepte din centralele de termoficare, fără instalație de tratare a condensatului principal, se manifestă coroziunea în profunzime în treapta a II-a, în care conținutul de săruri este ridicat.

La cazanele cu străbatere forțată, se formează uneori magnetită în exces, care este antrenată de apă și poate produce avarii prin înfundarea duzelor de egalizare a presiunilor.

O cauză de avariere a țevilor vaporizatoare o constituie și eroziunea cauzată de suflătoarele de funingine dereglate sau greșit amplasate.

Defectele de fabricație ca excentricități, suprapuneri, fisuri, incluziuni etc. sînt cauzele multor spargeri de țevi vaporizatoare, după durate relativ reduse de funcționare. S-a constatat apariția de defecțiuni în special în curbele țevilor de coborîre.

2.1.2. Supraîncălzitorul

În supraîncălzitoare, care prin funcțiunea lor lucrează la temperaturi ridicate, țevile sînt supuse fenomenului de fluaj. Utilizarea unor oțeluri de calitate necorespunzătoare condițiilor de lucru a avut adesea ca urmare producerea de avarii. Pe de altă parte, țevile sînt supuse coroziunii interioare, produse de abur și coroziunii exterioare, produse de gazele de ardere. La depășirea unui anumit nivel de temperatură, caracteristic pentru fiecare marcă de oțel, se accelerează mult fenomenul de oxidare (formare de scorii).

O formă deosebită de solicitare a supraîncălzitoarelor o constituie coroziunea vanadică, care se manifestă la temperaturi ridicate ale metalului și anume cu începere de la aproximativ 600°C. Acest fenomen se manifestă în mod deosebit la arderea păcurii cu conținut ridicat de vanadiu și sulf. Uneori se produc fenomene de coroziune-eroziune, caracterizate prin formarea de depuneri aderente și agresive, care corodează metalul, urmată de îndepărtarea lor prin suflare, echivalentă cu un fenomen de eroziune. Pierderea de material progresează cu numărul de cicluri depunere-curățare.

Suporturile țevilor de supraîncălzitor sînt expuse pericolului de oxidare, dacă nu se asigură o răcire suficientă a acestora. La unii suporți, s-au produs fragilizări ale sudurilor, urmate de ruperea lor. În aceste cazuri s-a constatat că au fost utilizați electrozi de sudură neadecuați, cu conținut ridicat de crom.

Țevile de supraîncălzitor sînt supuse unui efort termic permanent, suprapus peste efortul mecanic generat de presiunea interioară. Efortul termic depinde de intensitatea fluxului de căldură prin pereții țevilor. Cele mai expuse unor solicitări excesive sînt treptele de radiație ale supraîncălzitoarelor, mai ales în perioadele de pornire. Neuniformitatea cîmpului de temperatură în fluxul de gaze de ardere produce de asemenea solicitări locale mari.

Uneori, solicitările care duc la defectarea țevilor provin din împiedicarea dilatării termice a acestora. Trebuie subliniat faptul că defecțiunile cauzate de suprasolicitări se manifestă după un număr de cicluri de încărcare-descărcare, cu atît mai mic cu cît suprasolicitarea este mai mare.

Solicitări prin șoc termic se produc în special în colectoarele răcitoarelor prin injecție, ca urmare a defectării sistemului interior de răcire.

Treptele de supraîncălzire dispuse în canalele convective sînt supuse efectului de eroziune produs de cenușa zburătoare. Depunerile de zgură pot să intensifice eroziunea țevilor, prin îngustarea secțiunilor de trecere și, în acest fel, prin mărirea vitezei gazelor de ardere și a particulelor de cenușă antrenate.

Este important de menţionat că îngroşarea pereţilor ţevilor, atît pentru a mări rezistenţa lor la eforturi, cît şi pentru a crea o rezervă de material pentru limitarea efectului fenomenului de eroziune, este o măsură cu efect limitat. Creşterea grosimii peretelui are ca efect creşterea eforturilor termice, astfel că unele norme limitează grosimea admisibilă a pereţilor ţevilor, care lucrează în regim de încărcare termică ridicată.

2.1.3. Economizorul

Cele mai frecvente defecţiuni ale economizoarelor sînt produse de eroziune prin cenuşă zburătoare. Aceasta se manifestă cu intensitate deosebită în spaţiul în care viteza gazelor şi a particulelor de cenuşă este mărită şi în locurile unde concentraţia de cenuşă este mare.

Alţi agenţi de eroziune sînt jeturile de apă, care ies prin porii sudurilor dintre tronsoanele de ţevi. Uzura pereţilor ţevilor de economizor este produsă uneori şi de suporţii lor, în cursul proceselor de dilatare termică.

2.1.4. Preîncălzitorul de aer

Regiunea preîncălzitorului de aer este, datorită temperaturii scăzute a metalului, o zonă caracteristică pentru coroziunea prin compuşii de sulf. Aceasta se produce intens mai ales la arderea de păcură sulfuroasă. La arderea de cărbuni, coroziunea sulfurică este mai puţin intensă, datorită efectului inhibitor al cenuşei.

Cenuşa produce şi eroziunea elementelor preîncălzitoarelor.

Preîncălzitoarele rotative sînt supuse şi avariilor prin eroziune mecanică, produsă de vibraţia pachetelor de table.

Toate tipurile de preîncălzitoare de aer constituie zone în care este posibilă apariţia incendiilor. Această primejdie este mai probabilă la funcţionarea pe păcură, la sarcină redusă, cum se întîmplă în timpul funcţionării de probă. Incendiile în preîncălzitoarele de aer sînt uneori consecinţa unor greşeli de exploatare, care determină funcţionarea cu lipsă de aer. Astfel de cazuri au fost semnalate chiar la cazane în care se ard gaze.

Funinginea produsă la o ardere incompletă este transportată de gazele de ardere şi depusă pe suprafeţele reci ale preîncălzitorului de aer. Se poate acumula în acest fel o cantitate destul de mare de funingine, care se aprinde în contact cu o sursă de căldură de temperatură ridicată şi cuprinde masa metalică a preîncălzitorului. Combustiunea este posibilă datorită pătrunderilor de aer prin neetanşeităţi, pe partea gazelor de ardere, mai ales la preîncălzitoarele rotative [2.1].

2.1.5. Focare

Arderea combustibililor gazoşi este însoţită de pericolul exploziilor în focar, care sînt aproape întotdeauna consecinţa unor greşeli de exploatare. Exploziile se produc în urma pătrunderii necontrolate a gazelor în focar. Asemenea pătrunderi se întîmplă mai ales în timpul opririlor de scurtă durată, prin vane de pe conductele de gaze, rămase deschise. Un caz grav de explozie s-a produs după o oprire la care vanele a două arzătoare au fost uitate deschise. La repornire, s-a deschis vana de pe conducta principală. Pînă la aprinderea arzătoarelor, a pătruns în focar prin cele două vane rămase deschise o cantitate suficientă de gaze, pentru ca în contact cu flacăra de aprindere să se producă o explozie puternică.

Asemenea explozii se pot produce şi la aprinderea unor arzătoare de la cele aflate în funcţiune. O asemenea manevră de aprindere este interzisă prin instrucţiunile de exploatare.

Acumularea de gaze în focar, urmată de explozie, s-a produs într-un caz ca o consecinţă a lăsării fără supraveghere a flăcării de uscare a focarului unui cazan nou. În urma variaţiei de presiune a gazelor în reţea, flacăra s-a stins, gazele au continuat să pătrundă în focar şi, în contact cu un element metalic aflat la temperatură ridicată, au explodat.

Un caz special de explozie s-a produs la mai multe cazane de tip vechi, la care ţevile de coborîre treceau prin spaţii închise de zidăria cazanului. Prin spargerea unei ţevi de coborîre, s-a creat în aceste cazuri o suprapresiune în spaţiile închise, care a produs dărîmarea zidăriei şi avarierea gravă a cazanelor.

2.2. AVARII LA CONDUCTE

Conductele din centralele electrice sînt supuse la eforturi mecanice sub efectul presiunii interioare, eforturi termice cu caracter static generate prin împiedicarea dilatării libere şi eforturi termice cu caracter dinamic, generate în timpul perioadelor tranzitorii de funcţionare de către diferenţele de temperatură din peretele lor. Prin variaţia ciclică a acestor solicitări, se produce o obosire a materialului. La conductele care lucrează la temperatură ridicată, peste obosirea prin solicitare ciclică, se suprapune fenomenul de fluaj. Ca efect al obosirii materialului, apar fisuri în cele mai solicitate porţiuni ale sistemului de conducte.

Localizarea solicitărilor maxime depinde de configuraţia sistemului de conducte şi de concentratoarele de tensiuni. Principalele concentratoare de tensiuni sînt curbele ovalizate ale sistemului, piesele fasonate şi sudurile. În zonele sudurilor, se manifestă şi tensiuni remanente. Pe

de altă parte, în aceste zone se produc modificări de structură ale materialului, sub efectul proceselor de sudură și tratament termic.

Alte puncte slabe ale sistemului sînt localizate în jurul defectelor de fabricație, mai ales ale pieselor fasonate.

2.3. AVARII LA TURBINE CU ABUR

Defecțiunile care se produc în turbinele cu abur se pot clasifica în două grupe mari și anume: defecțiuni cauzate de solicitări și defecțiuni cauzate de atingeri între partea mobilă și partea fixă a mașinilor. La rîndul lor, aceste categorii cuprind mai multe grupe de cauze.

O statistică a avariilor produse într-o perioadă îndelungată la 84 turbine cu puteri unitare cuprinse între 100 și 370 MW indică frecvența principalelor categorii de defecte apărute [2.2]:

— atingeri între piese fixe și mobile	23,0%
— încovoierea axului	2,4%
— ruperi la solicitare de durată	18,5%
— supraîncărcarea	9,3%
— fisuri provocate de solicitări termice	11,7%
— fisuri provocate de alte cauze	8,0%
— defecțiuni de lagăre	14,6%
— deteriorări mecanice ale elementelor turbinei	5,4%
— coroziune	3,3%
— eroziune	2,3%
— uzură	1,5%

2.3.1. Carcasele turbinelor cu abur

Solicitările la care sînt supuse carcasele sînt de natură mecanică (presiune) și termică (diferențe de temperatură) și au un caracter oscilant. Obosirea la aceste solicitări, combinată cu obosirea la fluaj în zonele de temperatură ridicată, generează fisuri în peretele carcasei. Fisurile în cutiile și carcasele ventilelor de reglaj sînt generate în numeroase cazuri de forma acestora, necorespunzătoare pentru tehnologia de turnare, pentru dilatarea termică și pentru solicitarea din timpul funcționării. Asemenea forme necorespunzătoare se caracterizează prin acumulări de material și modificări bruște de secțiune, care nu permit o contracție uniformă și liberă în timpul răcirii a piesei turnate. În timpul funcționării, aceste zone acționează în sensul concentrării tensiunilor.

Tensiuni mărite sînt generate și de forma de ansamblu a unor piese mari. Este de exemplu cazul carcaselor de înaltă presiune, cu canale turnate de admisie a aburului la sectoarele de ajutaje. Piesele turnate cu grosime variabilă cuprind în zonele de tranziție concentratoare de tensiune, din cauza rigidității diferite [2.3].

Și defectele de turnare, ca pori, incluziuni de zgură, sufluri, incluziuni de substanțe străine (nisip de formare) constituie concentratoare de tensiuni și locuri favorabile pentru apariția fisurilor.

Fisuri pot să apară la contracția materialului în cursul răcirii pieselor după turnare. Materialul are în această zonă o reziliență scăzută [2.4].

Atingerile între carcasă și rotor se soldează de obicei cu avarii grave. Atingerile sînt urmarea unor cauze diverse, ca: deformații produse de tensiuni interne, de răcire sau încălzire neuniformă, defectarea lagărelor, dilatări relative prea mari în cursul proceselor tranzitorii de funcționare etc.

2.3.2. Rotoare

Ca și carcasele, rotoarele sînt supuse unor eforturi termice. Eforturile mecanice sînt date de forțele centrifuge, de impulsul aburului și de diferențele de presiune pe trepte (în funcție de gradul de reacțiune). Efectul obosirii produse de solicitarea ciclică de frecvență coborîtă asupra corpului rotorului și de solicitarea ciclică de frecvență ridicată asupra paletelor se manifestă prin fisuri în material, în zonele concentratoare de tensiuni.

Defecte de maximă gravitate, avînd ca urmare distrugerea rotorului, se pot datora ambalării, precum și unor defecte de fabricație din timpul turnării și a tratamentului termic.

Cele mai frecvente sînt însă defectele paletelor rotorice. Ele sînt produse de obosirea prin vibrații, suprasolicitare mecanică în zone concentratoare de tensiuni, atingere de elementele fixe ale turbinei, coroziune de diferite tipuri, eroziune, lovire prin corpuri străine.

Paletele sînt supuse unui efort static, generat de forțele centrifuge și de impulsul aburului și unui efort dinamic. Ruperea paletelor se produce sub efectul combinat, fie a unui efort static ridicat cu un efort dinamic de amplitudine mică, fie a unui efort static coborît, cu un efort dinamic de amplitudine mare. Ruperile produse de aceste cauze încep pe muchia de ieșire a paletei, iar materialul prezintă în secțiune o granulație fină și linii netede de demarcație între zonele succesive de fisurare. Ruperile cauzate exclusiv prin suprasolicitările statică se caracterizează printr-o structură de fagure a suprafeței de rupere. Fisurile produse de eforturi mecanice sînt transcristaline.

Apariția avariilor prin suprasolicitare este favorizată de existența concentratoarelor de tensiuni, ca treceri neracordate între secțiuni de grosime diferită, în special la rădăcina paletelor, defecte de suprafață etc.

O grupă răspîndită de defecțiuni este cauzată de fenomenul de coroziune. Formele de manifestare a coroziunii sînt : coroziunea de repaus, coroziunea punctiformă (în profunzime), coroziunea sub tensiune și coroziunea sub efort oscilant. Coroziunea de repaus și coroziunea punctiformă creează amorsa pentru coroziunea sub efort oscilant. Coroziunea punctiformă și de repaus se manifestă sub forma de mici cratere în suprafața paletei. Coroziunea sub tensiune și sub efort oscilant se manifestă sub forma de fisuri. Suprafețele locurilor de defect produse de coroziunea sub tensiune se caracterizează prin fisuri intercristaline de-a lungul conturului granulelor. Coroziunea sub efort oscilant este caracterizată prin fisuri alternant transcristaline și intercristaline.

Defecțiunile la paletele rotorice, ca urmare a depășirii jocurilor admisibile între stator și rotor sînt cauzate de defecțiuni în lagăre, încovoierea arborelui, deformarea carcasei, greșeli de exploatare.

Eroziunea prin picături de apă se manifestă de obicei în ultimile trepte ale turbinei, sub formă de mici cratere care apar pe suprafața paletelor.

2.4. AVARII LA APARATE SCHIMBĂTOARE DE CĂLDURĂ

Cauzele posibile ale avariilor în aparatele schimbătoare de căldură din centralele electrice sînt în general de aceeași natură, însă poziția fiecăreia în statistica numărului de defecțiuni pe tip de aparat depinde de mediul de lucru. La condensatoare și răcitoare, cea mai mare parte a defecțiunilor sînt cauzate de coroziune (peste 90%), fiind preponderentă coroziunea în profunzime, urmată în ordine de coroziunea sub tensiune, eroziune — coroziune, dezincare, coroziune sub efort oscilant. La preîncălzitoarele regenerative, se produce cel mai frecvent eroziune — coroziune urmată de eroziune.

Coroziunea în profunzime se manifestă prin formarea de mici cratere pe suprafața țevilor, la fel ca și la coroziunea uniformă. La țevi cu grosimea de 1 mm, cratere cu diametru mai mare decît 0,1 mm se consideră efecte ale coroziunii în profunzime.

Coroziunea sub tensiune poate fi provocată de tensiunile remanente din țevi provenite de la fabricație. În acest caz, fisurile apar în prima fază de exploatare, sînt longitudinale și au un caracter intercristalin.

La capetele vălțuite ale țevilor, se produc fisuri prin coroziune sub tensiune, sub efectul tensiunilor remanente provenite din vălțuire. Fisurile apar în zona de trecere a vălțuirii, sînt transversale și au un caracter transcristalin.

Eroziunea-coroziunea se manifestă prin îndepărtări ale stratului protector de oxizi, pe lungimi pînă la 10 cm, în zone de turbulență ale curgerii

fluidului. Eroziunea-coroziunea constatată în unele cazuri pe porțiuni drepte ale țevilor se explică prin existența unor corpuri străine fixate inițial în acele puncte unde au creat turbulență. Dezincarea se manifestă printr-o îmbogățire a conținutului de cupru în dopuri de material, incluse în materialul sănătos al peretelui țevii. Zonele dezincate se formează sub straturi poroase, depuse pe suprafața țevii.

La preîncălzitoarele regenerative, se produc uneori eroziuni prin picăturile de apă accelerate în secțiuni de trecere îngustată.

2.5. AVARII LA ECHIPAMENTE AUXILIARE

2.5.1. Pompele de alimentare

Cele mai multe avarii ale instalațiilor de apă de alimentare se produc ca urmare a greșelilor de proiectare, în mai mică măsură a pompei însăși și în mai mare măsură a încadrării pompei în circuitele tehnologice ale centralei. Principalele defecțiuni se produc din cauza traseului și formei neadecvate ale conductelor de aspirație, de recirculare și de descărcare. Pe de altă parte, la o cădere de presiune relativ mică, este posibil să se producă vaporizarea apei în conducta de aspirație.

O altă categorie mare de avarii este cauzată de *neetanșeitatea organelor de închidere*, care are ca efect deformarea carcasei pompei în timpul menținerii acesteia în stare oprită.

Pătrunderea corpurilor străine în pompă, în lipsa unor site corect dimensionate, produce de asemenea, avarii frecvente.

În timpul funcționării de durată și sub influența condițiilor de funcționare, se produc defecțiuni prin uzură și coroziune. O formă specială a fenomenelor care produc uzura o constituie *cavitația*, care se produce în unele cazuri de conectare a pompei în condiții de cădere de presiune și vaporizare în conducta de admisie.

2.5.2. Ventilatoarele de gaze

În afară de defectele lagărelor, eroziunea este cauza cea mai importantă a avariilor ventilatoarelor de gaze de ardere. Eroziunea paletelor depinde de concentrația, de compoziția și de granulația cenușei din gazele de ardere. Concentrația și granulația cenușei depind de calitatea instalațiilor de desprăfuire.

Defectele de fabricație și în special sudurile paletelor, efectuate defectuos, pot genera avarii importante.

2.5.3. Morile de cărbune

Uzura produsă în timpul procesului de măcinare impune reparații dese, care au ca efect reducerea temporară a puterii blocului. Acest efect este influențat de reducerea treptată a debitului de cărbune măcinat de mori, ca urmare a uzurii produse în exploatare.

O altă cauză frecventă de avarii o constituie pătrunderea corpurilor metalice în moară.

BIBLIOGRAFIE

2.1. Central Electricity Generating Board. Modern Power Station Practice, vol. 2, Pergamon Press, 1971.

2.2. Allianz. Handbuch der Schadenverhütung, 1972.

2.3. Bohnstedt, H. J. *Schäden an frischdampfführenden Stahlgussteilen von Dampfturbinen.* În: Der Maschinenschaden, 1969, nr. 5, p. 148–154.

2.4. Meiser, H. *Risse und Fehler in Stahlgussteilen von Dampfturbinen, ihre Ursachen und Möglichkeiten zu ihrer Verhütung.* În: Der Maschinenschaden, 1969, nr. 5, p. 143–147.

3. MODUL DE PRODUCERE ȘI MĂSURI DE PREVENIRE A PRINCIPALELOR TIPURI DE AVARII ÎN INSTALAȚIILE TERMOMECANICE ALE CENTRALELOR ELECTRICE

3.1. DEPĂȘIREA SOLICITĂRILOR ȘI JOCURILOR ADMISIBILE

3.1.1. Solicitări în echipamentele termomecanice

Solicitările la care sînt supuse echipamentele termomecanice ale centralelor electrice sînt determinate de natura solicitării, de evoluția ei în timp și de geometria organului de mașină solicitat.

Natura solicitării. Solicitările pot fi clasificate în mecanice, termice și interne. Ele generează în material eforturi unitare care în cele ce urmează vor fi denumite în mod generic *tensiuni*, cu precizare, acolo unde va fi necesar, întindere, compresiune etc.

Solicitările mecanice sînt date de forțe exterioare, produse de agentul de lucru (prin diferențe de presiune, prin impulsuri), de forțe centrifuge, de forțe gravitaționale și de forțe aplicate de corpuri din exterior.

Solicitările termice sînt generate de dilatări termice împiedicate. Astfel, se iau în considerare atît dilatări față de reazeme, cît și dilatări relative ale fibrelor elementare componente ale materialului.

Solicitările interne sînt tensiuni remanente, provenite din tratamentul termic al pieselor și din deformarea plastică în funcțiune a materialului.

Elemente geometrice. Mărimea eforturilor unitare variază într-o anumită secțiune a piesei solicitate. Variația efortului unitar este datorată neregularităților geometrice, concentratoare de tensiuni și neuniformității spațiale a cauzei care produce solicitarea.

O serie de elemente ale echipamentelor termoenergetice se studiază în comun, pe modele geometrice regulate, simplificatoare din punctul de vedere al solicitărilor. Astfel sînt : tuburi sub presiune sau mantale cilindrice, din care fac parte tamburele, colectoarele, țevile, conductele, carcasele turbinelor, corpurile schimbătoarelor de căldură ; corpuri de rotație, din care fac parte rotoarele turbinelor cu abur și cu gaze.

Evoluția solicitării în timp. Principalele solicitări au un caracter periodic. O anumită categorie de solicitări are o frecvență ridicată, de exemplu solicitarea paletelor de turbină la impulsul aburului, iar o altă categorie are o frecvență coborîtă, de exemplu solicitările de natură termică și mecanică, produse de modificarea regimului de funcționare al instalației. Solicitările periodice produc obosirea materialului, ca obosirea la cicluri de solicitări cu frecvență coborîtă („low — cycle fatigue").

Materialul echipamentelor termomecanice este supus concomitent și la o altă formă de obosire și anume la fluaj. Durata de viață a pieselor este determinată de efectul combinat asupra materialelor respective al celor două forme de obosire.

3.1.2. Factorii determinanți ai solicitărilor

Solicitări mecanice. Presiunea interioară generează în tuburile sub presiune eforturi unitare normale după coordonatele de referință în spațiu, alese față de tub în direcțiile axială, tangențială și radială (fig. 3.1). Eforturile unitare tangențiale, σ_{tp}, se opun ruperii tubului într-o secțiune

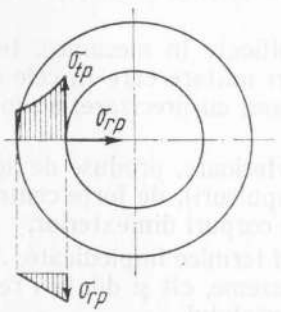
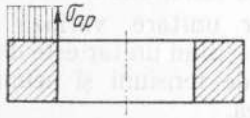


Fig. 3.1. Eforturi unitare mecanice.



dusă prin generatoare. Eforturile unitare axiale, σ_{ap}, se opun ruperii tubului într-o secțiune perpendiculară pe generatoare. Efortul unitar radial σ_{rp}, care variază în direcția razei între valorile presiunii, interioară și exterioară, se opune deplasării radiale a punctelor din secțiunea perpendiculară pe generatoare.

Efortul unitar produs de forța centrifugă depinde de viteza periferică, de distanța față de ax și de masă. El scade de la axa de rotație spre periferia piesei respective.

Eforturile unitare date de forțe gravitaționale sînt produse de greutatea proprie a arborelui și discurilor turbinei, de greutatea proprie a celorlalte piese, de greutatea fluidului transmis (apa din conducte) etc.

Arborele turbinelor este supus și unui moment de torsiune. Acest moment crește brusc în caz de scurtcircuit și poate ajuunge la valori de pînă la zece ori mai mari decît a momentului de torsiune exercitat la puterea maximă de durată.

Solicitări termice. Împiedicarea dilatării libere sub influența căldurii a unei piese produce în acea piesă forțe de compensare. Ca exemplu poate fi considerată o conductă AB (fig. 3.2), încastrată la unul din capete. Prin dilatare termică liberă, punctul B se deplasează în B'. Pentru readucerea extremității în poziția inițială B, este necesar să se aplice în capătul conductei o forță și un cuplu. Acestea sînt echivalente cu o forță R, care trece printr-un punct ale cărui coordonate pot fi calculate. În raport cu fiecare punct al conductei, forța R dă momente de încovoiere și de torsiune. Momentele la rîndul lor dau naștere în materialul conductei la eforturi unitare axiale, tangențiale și de torsiune, care se suprapun peste eforturile unitare produse de presiunea interioară. Peste acestea se suprapun eforturile datorate greutății proprii a conductei, cu izolație termică, precum și greutății volumului de apă cuprins în conductă.

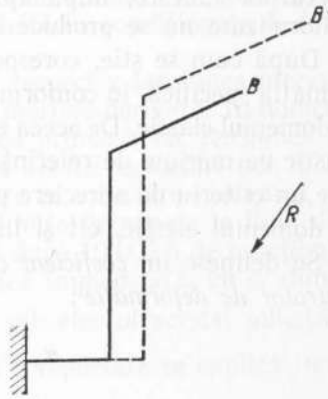


Fig. 3.2. Dilatarea termică a unei conducte.

Diferențele de temperatură într-o secțiune a materialului dau naștere la eforturi unitare din cauza deformației relative a fibrelor împiedicate de coeziunea materialului. Fibrele cu temperatură mai ridicată sînt parțial împiedicate să se dilate și sînt supuse unor eforturi de comprimare. Fibrele de temperatură mai coborîtă sînt întinse în mod forțat, fiind supuse unor eforturi unitare de întindere.

Tensiuni interne. Tensiunile interne provin de la fabricație, de la montaj și din exploatare.

Din contracție după turnare și din tratamentul termic după prelucrare se pot naște importante tensiuni interne.

La răcirea sudurilor, se produc tensiuni interne, prin contracția materialului de sudură în cursul solidificării lui. Valoarea lor depinde de tratamentul termic efectuat pentru detensionare.

În cursul probei hidraulice, se pot produce în locurile de solicitare maximă deformații plastice, care la dispariția presiunii generează tensiuni interne. Deformații pastice cu același efect se pot produce și în cursul proceselor tranzitorii de încălzire sau răcire.

Concentratoare de tensiuni. Neregularitățile geometrice (orificii, șanțuri superficiale, modificări de grosime etc.) au ca efect măriri locale ale tensiunilor din material. Ovalitatea pieselor de secțiune circulară generează de asemenea o amplificare a tensiunilor, deja mărite de detaliile concentratoare. Amplificarea tensiunilor, exprimată prin coeficientul de concentrare, are valori diferite, în funcție de tipul concentratorului și de natura solicitării (mecanică, termică, statică, dinamică).

Eforturile unitare maxime care iau naștere în zona concentratoarelor de tensiuni pot provoca deformarea plastică a materialului. În acest caz, curgerea este limitată de materialul din zonele învecinate cu zona de solicitare maximă. La materialele tenace, se produce o uniformizare a eforturilor unitare, după apariția deformației plastice locale. Această uniformizare nu se produce însă la materialele fragile.

După cum se știe, corespondența liniară dintre efortul unitar și deformația specifică, în conformitate cu *legea lui Hooke*, este valabilă numai în domeniul elastic. De aceea efortul unitar nu poate fi utilizat în domeniul plastic ca mărime de referință. În schimb dilatarea termică împiedicată este un criteriu de apreciere potrivit pentru solicitări care se produc atît în domeniul elastic, cît și în domeniul plastic.

Se definesc un *coeficient concentrator de tensiune* și un *coeficient concentrator de deformație*:

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_N}; \quad \alpha_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_N}, \tag{3.1}$$

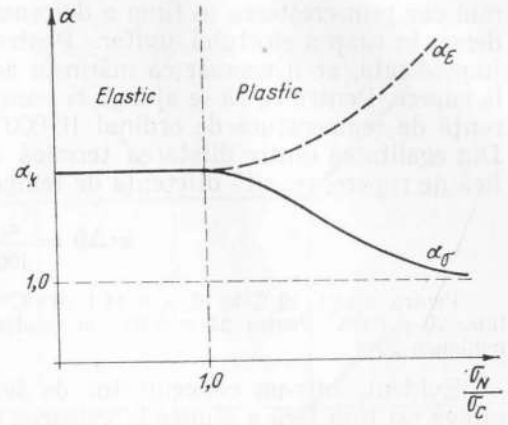


Fig. 3.3. Curbele de variație a coeficienților de concentrare.

în care: σ_N este tensiunea nominală; ε_N — deformația specifică nominală într-o secțiune neinfluențată de detaliul concentrator; σ_{max} și ε_{max} sînt respectiv tensiunea maximă și deformația specifică maximă, în zona detaliului concentrator.

Din diagrama tensiune-deformație specifică, rezultă legile de variație ale coeficienților α_σ și α_ε, reprezentate în fig. 3.3.

În zona elastică, $\alpha_\sigma = \alpha_\varepsilon = \alpha_k$. În domeniul supraelastic, α_σ tinde asimptotic spre 1, deoarece σ_N (în domeniul supraelastic) crește, în timp ce σ_{max} (în domeniul plastic) crește foarte puțin. Coeficientul α_ε crește în domeniul supraelastic, deoarece deformația plastică crește rapid, în zona detaliului concentrator.

Solicitarea condiționată de modificarea de forță sau de formă. Pentru a aprecia durata de funcționare a materialului, este necesar să se facă o diferențiere între eforturile mecanice și cele termice, cu alte cuvinte între solicitările condiționate de forță și solicitările condiționate de formă [3.1].

În domeniul solicitării mecanice, forța, respectiv tensiunea mecanică sînt mărimi primare, iar deformația este o mărime derivată. În domeniul solicitării termice, deformația este mărimea primară, iar tensiunea termică este o mărime derivată. Consecințele acestei deosebiri pot fi ilustrate prin comparația comportării unei bare la solicitare mecanică, respectiv termică. Dacă de exemplu σ_z este limita de rupere la fluaj după 10 000 h, bara se rupe sub efectul tensiunii după 10 000 h de funcționare. Considerînd un fenomen de dilatare termică împiedicată, cu o alungire împiedicată de mărime $\varepsilon = \frac{\sigma_z}{E}$, bara are sub efectul acestei solicitări o durată de funcționare nelimitată. Această comportare se explică în pri-

mul caz prin creşterea în timp a deformaţiei şi în al doilea caz prin scăderea în timp a efortului unitar. Pentru ca bara să se rupă la alungire împiedicată, ar fi necesar ca mărimea acesteia să fie egală cu alungirea la rupere. Pentru ca să se ajungă la asemenea valori, este necesară o diferenţă de temperatură de ordinul 10 000°C, ceea ce practic nu are sens. Din egalitatea dintre dilatarea termică împiedicată şi deformaţia specifică de rupere, rezultă diferenţa de temperatură necesară

$$\alpha \cdot \Delta\vartheta = \frac{\varepsilon_r}{100}. \qquad (3.2)$$

Pentru oţelul 10 CMo 10, $\alpha = 14{,}1 \cdot 10^{-6}°C^{-1}$ pentru intervalul de temperaturi între 20 şi 600°C. Pentru $\Delta\vartheta = 600°C$, ar rezulta $\varepsilon = 0{,}846\%$, mult sub ε_r, care este minimum 20%.

Evident, într-un concentrator de tensiuni, deformaţia ε creşte de cîteva ori însă fără a ajunge la valoarea de rupere. Rezultă că o solicitare statică poate produce ruperea materialului, dacă este de natură mecanică şi nu produce acest efect, dacă este de natură termică.

Solicitarea ciclică, de frecvenţă coborîtă. Dacă solicitarea termică are un caracter dinamic, cu variaţie ciclică, ea poate da naştere la fisuri, prin obosirea materialului. Majoritatea echipamentelor termomecanice din centralele electrice sînt supuse unor eforturi cu caracter dinamic ca urmare a pornirilor şi opririlor, precum şi a variaţiilor de sarcină. Este important de menţionat faptul că solicitarea ciclică repetată este caracteristică nu numai într-un regim de funcţionare de vîrf al echipamentelor, dar şi primelor perioade de funcţionare ale acestora, cînd au loc un număr mare de opriri şi porniri din diverse cauze : defecte de fabricaţie, nepuneri la punct ale automatizărilor etc.

În fig. 3.4, *a* este prezentată variaţia, în funcţie de timp, a temperaturii ϑ a fibrei aflate în contact cu agentul termic ; în fig. 3.4, *b* se reprezintă variaţia în funcţie de timp a diferenţei de temperatură $\Delta\vartheta$, în secţiunea materialului. Se constată caracterul de ciclu alternant al variaţiei diferenţei de temperatură şi deci a solicitării în secţiunea materialului.

În perioada de încălzire t_0—t_1, temperatura creşte, în perioada t_1—t_2 rămîne constantă, în perioada t_2—t_3 descreşte la valoarea iniţială, în perioada t_3—t_4 rămîne constantă şi în momentul t_4 începe un nou ciclu de variaţie. În cursul ciclului diferenţa de temperatură are o variaţie alternantă, anulîndu-se la capetele intervalelor în care temperatura fibrei încălzite a rămas constantă şi în care s-a produs egalizarea temperaturilor în material. De obicei vitezele de încălzire şi răcire sînt diferite, astfel că în general, valorile maximă şi minimă a diferenţei de temperatură în material nu sînt egale.

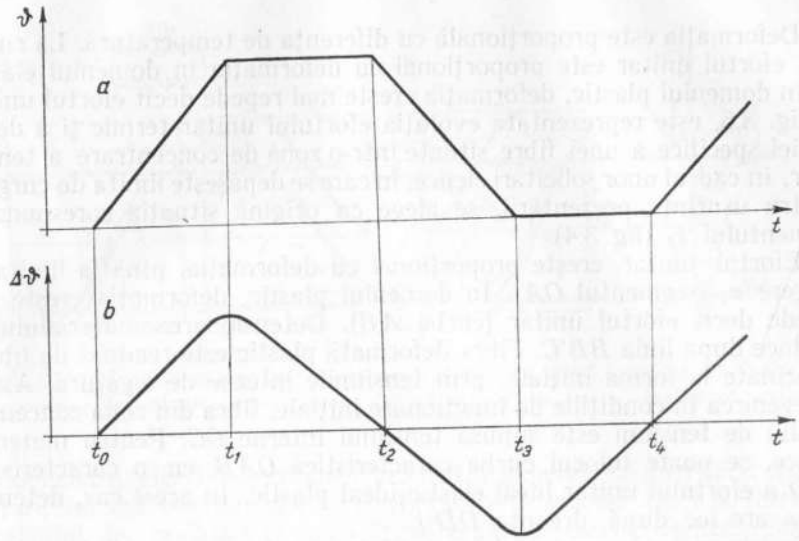


Fig. 3.4. Variaţie ciclică de temperatură.

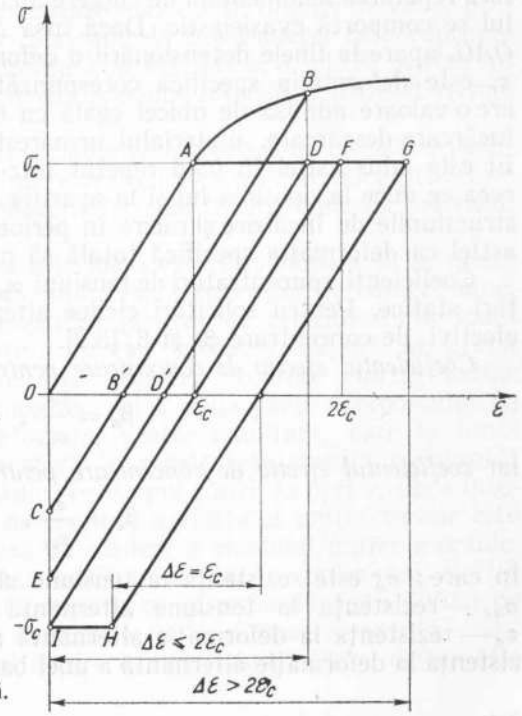


Fig. 3.5. Deformaţia plastică ciclică.

Deformația este proporțională cu diferența de temperatură. La rîndul său, efortul unitar este proporțional cu deformația în domeniul elastic, iar în domeniul plastic, deformația crește mai repede decît efortul unitar. În fig. 3.5, este reprezentată evoluția efortului unitar termic și a deformației specifice a unei fibre situate într-o zonă de concentrare a tensiunilor, în cadrul unor solicitări ciclice, în care se depășește limita de curgere. Pentru ușurința prezentării, se alege ca origină situația corespunzînd momentului t_3 (fig. 3.4).

Efortul unitar crește proporțional cu deformația, pînă la limita de curgere σ_c (segmentul OA). În domeniul plastic, deformația crește mai repede decît efortul unitar (curba AB). Detensionarea materialului se produce după linia $BB'C$. Fibra deformată plastic este readusă de fibrele învecinate la forma inițială, prin tensiunile interne de legătură. Astfel, la revenirea în condițiile de funcționare inițiale, fibra din zona concentratorului de tensiuni este supusă tensiunii interne OC. Pentru materiale tenace, se poate înlocui curba caracteristică OAB cu o caracteristică OAD a efortului unitar ideal elastic/ideal plastic. În acest caz, detensionarea are loc după dreapta $DD'E$.

Se observă că, pentru deformații totale $\Delta\varepsilon \leqslant 2\varepsilon_c$, ciclul se repetă fără repetarea fenomenului de curgere apărut în prima perioadă. Materialul se comportă cvasielastic. Dacă însă $\Delta\varepsilon > 2\varepsilon_c$, de exemplu evoluția OAG, apare la finele detensionării o deformație plastică de revenire HI. ε_c este deformația specifică corespunzătoare curgerii materialului și are o valoare admisă de obicei egală cu 0,2%. La repetarea ciclului de încărcare-descărcare, materialul urmărește bucla de histerezis $IFGHI$. El este adus astfel în mod repetat într-o stare de deformare plastică, ceea ce duce la obosirea lui și la apariția de fisuri. Din acest motiv, instrucțiunile de încălzire și răcire în perioadele tranzitorii sînt concepute astfel ca deformația specifică totală să nu depășească valoarea de $2\varepsilon_c$.

Coeficienții concentratori de tensiuni α_σ și α_ε sînt valabili pentru solicitări statice. Pentru solicitări ciclice alternante, se definesc coeficienții efectivi de concentrare β_σ și β_ε [3.2].

Coeficientul efectiv de concentrare pentru tensiuni este:

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_a}{\sigma_{ac}}, \tag{3.3}$$

iar *coeficientul efectiv de concentrare pentru deformații*:

$$\beta_\varepsilon = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{ac}}, \tag{3.4}$$

în care: σ_a este rezistența la tensiune alternantă a unei bare netede; σ_{ac} — rezistența la tensiune alternantă a unei bare cu crestătură; ε_a — rezistența la deformație alternantă a unei bare netede; ε_{ac} — rezistența la deformație alternantă a unei bare cu crestătură.

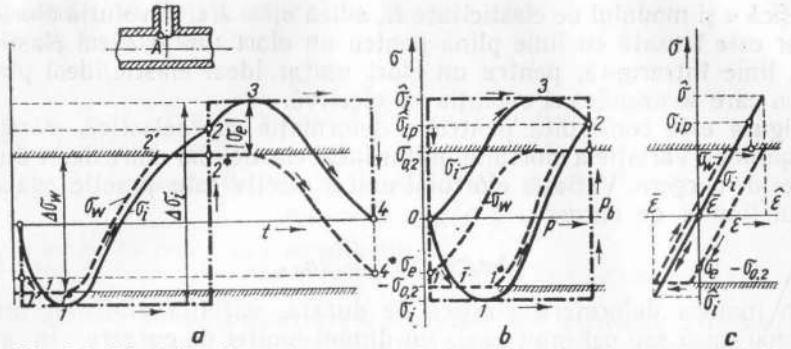


Fig. 3.6. Efortul unitar într-un concentrator de tensiuni (punctul A) [3.3]:
——— ideal elastic; — —=- ideal elastic/ideal plastic; - — - — echivalent (la aceeași deformație).

Coeficienții efectivi de concentrare sînt în general mai mici decît coeficienții de concentrare, dar alura variației lor este aceeași. Dacă se introduc în calculul de verificare la solicitări alternante valorile coeficienților de concentrare, se introduce implicit un coeficient de siguranță suplimentar.

Evoluția ciclică a eforturilor unitare maxime în funcție de timp, presiune și alungire în cursul unei perioade de funcționare, care cuprinde o pornire și o oprire, este reprezentată în fig. 3.6, *a*, *b*, *c* [3.3] pentru un tub cilindric cu ramificație, aflat sub presiune interioară și izolat termic spre exterior.

Eforturile unitare provin din compunerea eforturilor mecanice generate în acest caz de presiunea interioară, cu eforturile termice provenite din împiedicarea reciprocă a dilatării termice între fibrele de material, în grosimea peretelui.

La începutul încălzirii, fibra interioară este împiedicată să se dilate liber și este supusă prin aceasta unui efort tangențial de compresiune, considerat negativ. Efortul tangențial generat de presiunea interioară este de întindere, adică pozitiv. Efortul unitar rezultant în prima parte a procesului de încălzire este negativ, deoarece efortul unitar termic este mai mare decît cel mecanic. În a doua parte a procesului de încălzire, se schimbă semnul efortului unitar rezultant, care la funcționarea de regim (cînd temperatura în perete este practic constantă) este egal cu efortul unitar mecanic. În timpul răcirii la oprire, fibra interioară este întinsă, iar viteza de creștere a efortului unitar termic este la început mai mare decît viteza de scădere a efortului unitar mecanic, astfel că la început efortul unitar rezultant crește. În continuare, efortul unitar rezultant scade. În figură se vede că în urma depășirii limitei de curgere, perioada de solicitare se încheie cu tensiunea remanentă — σ_e. Se definește efortul unitar ideal elastic σ_i ca produsul dintre deformația

specifică ε și modulul de elasticitate E, adică $\sigma_i = E\varepsilon$. Evoluția efortului unitar este trasată cu linie plină pentru un efort unitar ideal elastic σ_i și cu linie întreruptă, pentru un efort unitar ideal elastic/ideal plastic σ_w, cu care se asimilează evoluția sa efectivă.

Figura este construită pentru o deformație supraelastică, căreia îi corespunde o variație a efortului unitar ideal elastic mai mare decît dublul limitei de curgere. Variația efortului unitar efectiv este practic egală cu dublul limitei de curgere:

$$\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_w = 2\sigma_{0,2}. \tag{3.5}$$

În ipoteza deformării elastice de durată, variația efortului unitar este mai mică sau cel mult egală cu dublul limitei de curgere. În acest caz, ciclurile se desfășoară începînd cu a doua perioadă, conform relației de proporționalitate între efortul unitar efectiv și deformație. Trebuie relevat faptul că fenomenele reale sînt mai complicate decît în reprezentările făcute, deoarece limita de curgere este o funcție de temperatură. Se poate admite însă o aproximare, prin considerarea unei temperaturi de calcul constante, de exemplu media aritmetică a limitelor de variație ale temperaturii.

Efortul unitar local maxim. Din însumarea eforturilor unitare normale locale de natură mecanică și termică, se obțin eforturile unitare normale locale rezultante, iar din compunerea acestora, după una din teoriile de rezistență, se obțin eforturile unitare locale echivalente. Din comparația expresiilor stabilite pentru eforturile unitare normale locale, se pot face pentru tuburile aflate sub presiune interioară și încălzite din interior următoarele constatări:

— efortul unitar tangențial generat de presiunea interioară pe fibra interioară este mai mare decît cel generat pe fibra exterioară;

— efortul unitar radial produs de presiunea interioară amplifică efortul unitar echivalent pe fibra interioară; pe fibra exterioară el este nul;

— efortul unitar axial produs de presiunea interioară este egal pe cele două fibre;

— eforturile unitare tangențial și axial produse de diferența de temperatură sînt mai mari pe fibra interioară decît pe fibra exterioară;

— efortul unitar radial generat de diferența de temperatură este nul pentru ambele fibre.

Concluzia finală este că pentru elemente de echipamente termomecanice din instalațiile energetice, încălzite din interior, fibra interioară este fibra cea mai solicitată.

Dacă se compară eforturile unitare echivalente la care este supusă fibra cea mai solicitată, adică fibra interioară, în timpul încălzirii și în timpul răcirii, se constată că efortul unitar cel mai mare apare, în condiții

echivalente, în timpul răcirii. Se observă că:

— în timpul încălzirii

$$\sigma_{tti} < 0,\ \sigma_{tpi} > 0,$$
$$\sigma_{ati} < 0,\ \sigma_{api} > 0,\ \sigma_{rti} = 0,\ \sigma_{rpi} < 0;$$

— în timpul răcirii

$$\sigma_{tti} > 0,\ \sigma_{tpi} > 0,\ \sigma_{ati} > 0,\ \sigma_{api} > 0,\ \sigma_{rti} = 0,\ \sigma_{rpi} < 0, \tag{3.6}$$

în care indicii au următoarele semnificații:
— indicii din poziția întîia se referă la direcția în care acționează efortul, t (tangențial), a (axial), r (radial);
— indicii din poziția doua se referă la natura solicitării, p (presiune), t (temperatură);
— indicii din poziția treia se referă la poziția fibrei solicitate, i (interior).

Dacă pentru simplitate se admite calculul efortului unitar echivalent pe baza teoriei efortului unitar tangențial maxim, se vede că expresia:

$$\sigma_{ech} = (\sigma_{tpi} + \sigma_{tti}) - \sigma_{rpi} \tag{3.7}$$

este mai mare în perioada de răcire decît în perioada de încălzire. Trebuie menționat faptul că, în timpul avariilor, este posibil ca, prin răcire, să apară variații mari de temperatură.

Solicitarea ciclică de frecvență ridicată. Paletele turbinelor sînt supuse solicitărilor statice de bază produse de forța centrifugă și de impulsul aburului, peste care se suprapune o solicitare dinamică de frecvență ridicată, condiționată de anumite elemente constructive, ca grosimea pereților ajutajelor.

Materialul rezistă la solicitarea alternantă de frecvență ridicată, cu condiția ca amplitudinea ei să nu depășească anumite limite. Pe de altă parte, suma solicitărilor nu trebuie să depășească limita de curgere a materialului. În fig. 3.7 este indicată forma unei diagrame reprezenta-

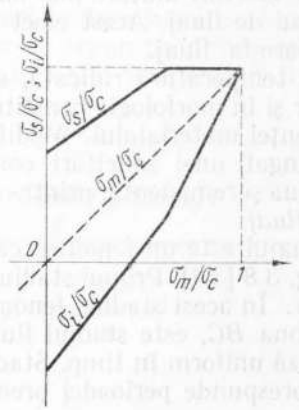


Fig. 3.7. Diagrama solicitării ciclice admisibile.

tive pentru solicitarea de durată admisibilă a unui oțel. În abscisă este trecută variația efortului unitar static mediu σ_m, iar în ordonată variația limitei superioare σ_s și a limitei inferioare σ_i a solicitării rezultante admisibile în funcție de σ_m. Reprezentarea este făcută în valori relative, raportate la limita de curgere σ_c. La creșterea solicitării statice, scade valoarea admisibilă a solicitării dinamice. Ruperile produse prin vibrații se împart în două categorii, după raportul dintre mărimile celor două moduri de solicitare.

Una dintre categorii este caracterizată prin amplitudinea mare a efortului dinamic, care se compune cu un efort static de valoare mică. Cauza amplitudinii ridicate este fenomenul de rezonanță între frecvența proprie de vibrație a paletei și frecvența impulsurilor de excitație. Apropierea de rezonanță este o urmare a deficiențelor de calcul la vibrație, a deficiențelor de execuție, din care rezultă un domeniu prea larg de abatere de la valoarea nominală a frecvenței proprii de vibrație a paletelor de același tip, a slăbirii paletei în canalul de fixare. Prin slăbirea paletei crește lungimea de vibrație și scade frecvența proprie de vibrație.

A doua categorie este caracterizată prin valoarea ridicată a eforturilor statice, la care se adaugă un efort dinamic de amplitudine mică. În ambele categorii de avarii, zonele concentratoare de tensiuni joacă un rol însemnat.

Deteriorarea stratului de magnetită. Suprafețele elementelor sub presiune aflate în contact cu apa sînt protejate de coroziune de un strat de magnetită. Acesta este un material casant. Eforturile unitare nu trebuie să depășească rezistența de rupere a acestui strat, deoarece în caz contrar se produc fisuri prin coroziunea la efort alternant.

Fluajul. Materialul echipamentelor termomecanice este supus și unei obosiri de durată, prin fenomeul de fluaj, cu efort unitar constant și la temperatură practic constantă. În timpul proceselor tranzitorii, se produc eforturi unitare mai mari decît cele de regim, ceea ce accelerează procesul de fluaj. Acest efect trebuie luat în considerație la calculul de verificare la fluaj.

La temperatură ridicată, au loc în oțeluri modificări în compoziția fazelor și în morfologia constituenților metalografici, care duc la scăderea rezistenței materialului. Modificările de structură a oțelului, supus timp îndelungat unei solicitări constante, se manifestă printr-o deformare continuă și remanentă, printr-o curgere lentă a materialului în timp, denumită *fluaj*.

Fluajul este un fenomen care se desfășoară în timp, așa cum rezultă din fig. 3.8 [3.4]. Primul stadiu, zona *AB*, este denumit stadiu al fluajului primar. În acest stadiu, fenomenul nu este încă stabilizat. Al doilea stadiu, zona *BC*, este stadiul fluajului propriu-zis, în care fenomenul progresează uniform în timp. Stadiul al treilea, zona, *CD*, al fluajului accelerat, corespunde perioadei premergătoare momentului de distrugere prin

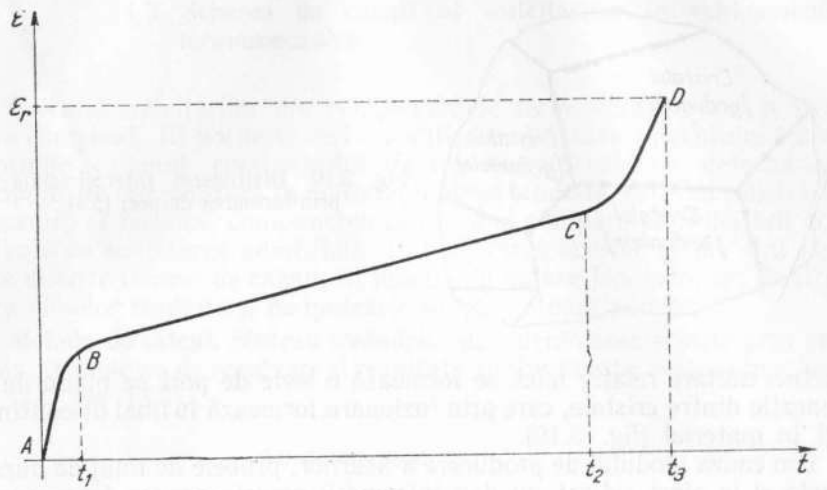


Fig. 3.8. Evoluția fenomenului de fluaj.

rupere a materialului. Uneori stadiul al treilea se împarte în două : prima parte este denumită a fluajului accelerat, iar a doua a fluajului distructiv.

Fluajul este un fenomen care începe din momentul punerii în serviciu a materialului. Încă de la începutul primului stadiu se poate constata o micșorare a densității epruvetelor. Cu timpul se produc microfisuri, care se pun în evidență mai ales în stadiul final. Caracterul distrugerii se modifică odată cu creșterea temperaturii. La început, distrugerea este intracristalină iar apoi, începînd de la o temperatură denumită de echicoeziune, distrugerea devine intercristalină.

La temperaturi relativ scăzute și eforturi unitare mari, se formează microspații în formă de pană pe planurile de separație dintre cristale, care se extind și se unifică în timp (fig. 3.9). La temperaturi mari și

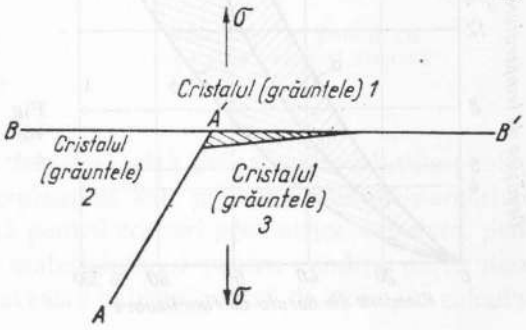


Fig. 3.9. Distrugerea intercristalină prin formarea de microspații în formă de pană [3, 4].

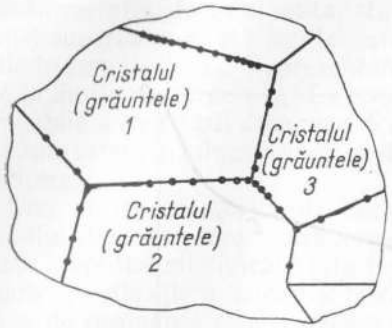


Fig. 3.10. Distrugerea intercristalină prin formarea de pori [3.4].

eforturi unitare relativ mici, se formează o serie de pori pe planurile de separaţie dintre cristale, care prin fuzionare formează în final discontinuităţi în material (fig. 3.10).

Din cauza modului de producere a fisurilor, probele de fluaj de durată scurtă şi la efort ridicat nu dau informaţii corecte asupra fenomenului real de fluaj, care se petrece la eforturi mai mici şi într-o perioadă de timp mai mare. Din acest motiv, este necesar ca probele de fluaj utilizate prin extrapolare pentru determinarea caracteristicilor materialului să fie efectuate cu o durată destul de mare (de exemplu 10 000 h).

În instalaţiile aflate în exploatare, fluajul este accelerat de depăşirea temperaturilor nominale de calcul. O depăşire de numai 5 grade produce, la temperaturile de funcţionare uzuale azi, o scădere a duratei de funcţionare de 23 la 33%, pentru oţelurile austenitice şi de 33 la 46%, pentru oţelurile ferito-perlitice aliate. În fig. 3.11 este prezentat efectul supratemperaturii asupra reducerii duratei de funcţionare [3.5].

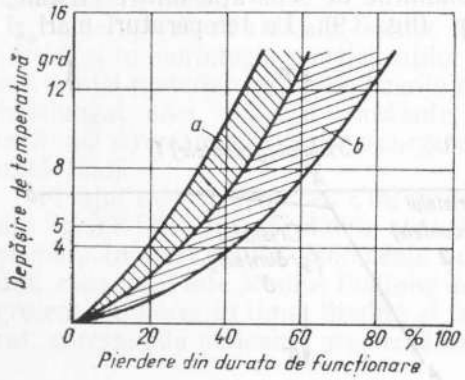
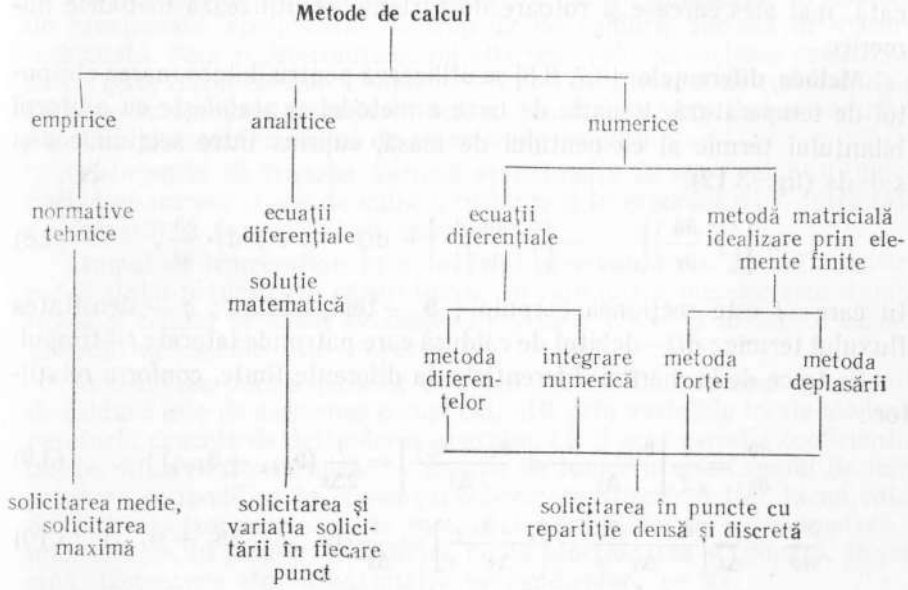


Fig. 3.11. Efectul depăşirii de temperatură asupra duratei de funcţionare [3.5]:
a — oţel austenitic; *b* — oţel feritic, respectiv ferito-perlitic.

3.1.3. Schema de calcul al solicitărilor în echipamentele termomecanice

Calculul solicitărilor din echipamentele termomecanice are o structură complexă. El porneşte de la modificarea de stare a agentului termic, cuprinde calculul coeficienţilor de transfer de căldură, determinarea cîmpului de temperatură în materialul piesei studiate, calculul solicitărilor mecanice şi termice, compunerea acestora şi compararea solicitării echivalente cu solicitarea admisibilă. În rezolvarea acestor etape, sînt necesare diferite tehnici de calcul, în funcţie de natura fenomenelor, de structura pieselor studiate şi de ipotezele simplificatoare admise.

Metode de calcul. Sinteza metodelor de calcul caracterizate prin principiu, tehnologie de rezolvare şi rezultate obţinute este arătată în schema de mai jos [3.6].



În categoria normativelor tehnice, intră de exemplu relaţiile pentru calculul grosimii pereţilor recipienţilor sub presiune. Metodele analitice rezolvă cazuri idealizate, adică pentru corpuri geometrice regulate, pentru proprietăţi constante ale materialului şi pentru condiţii particulare de transmitere a căldurii. În această categorie intră de exemplu calculul

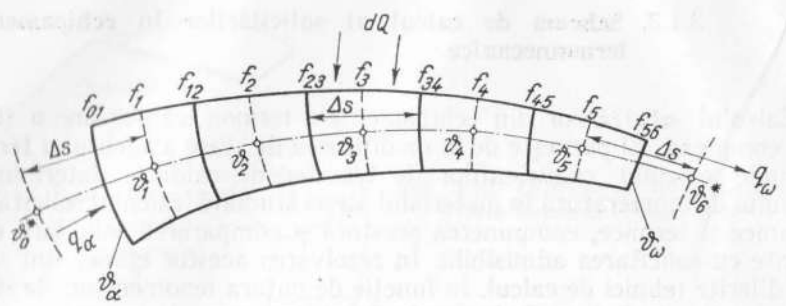


Fig. 3.12. Diviziunea în elemente a unei piese, pentru calculul cu metoda diferențelor.

eforturilor în pereții unui tub cilindric în regim de încălzire cvasistațio-nar. Pentru determinarea eforturilor locale în corpuri cu formă compli-cată, mai ales carcase și rotoare de turbină, se utilizează metodele nu-merice.

Metoda diferențelor [3.7, 3.8] se utilizează pentru determinarea cîmpu-lui de temperatură. Ecuația de bază a metodei se stabilește cu ajutorul bilanțului termic al elementului de masă, cuprins între secțiunile s și $s + ds$ (fig. 3.12).

$$\lambda \left[\left(f \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial s} \right) \Big|_{s+ds} - \left(f \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial s} \right) \Big|_{s} \right] + dQ = \rho \cdot c \cdot f \cdot ds \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t}, \qquad (3.8)$$

în care : f este secțiunea corpului ; ϑ — temperatura ; q — densitatea fluxului termic ; dQ—debitul de căldură care pătrunde lateral ; t—timpul.

Se trece de la mărimi diferențiale, la diferențe finite, conform relații-lor :

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial s} = \frac{1}{2} \left[\frac{\vartheta_{i+1} - \vartheta_i}{\Delta s} + \frac{\vartheta_i - \vartheta_{i-1}}{\Delta s} \right] = \frac{1}{2\Delta s} (\vartheta_{i+1} - \vartheta_{i-1}) ; \qquad (3.9)$$

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial s^2} = \frac{1}{\Delta s} \left[\frac{\vartheta_{i+1} - \vartheta_i}{\Delta s} - \frac{\vartheta_i - \vartheta_{i-1}}{\Delta s} \right] = \frac{1}{\Delta s^2} \cdot (\vartheta_{i+1} - 2\vartheta_i + \vartheta_{i-1}) \qquad (3.10)$$

În urma dezvoltărilor matematice, se obține :

$$\vartheta_i (t + \Delta t) = \vartheta_i + \left\{ \frac{\lambda}{\rho c \Delta s^2} \left[\vartheta_{i+1} - 2\vartheta_i + \vartheta_{i-1} + \frac{\Delta f_i}{2 f_i} \cdot (\vartheta_{i+1} - \vartheta_{i-1}) \right] + \right.$$
$$\left. + \frac{\varphi(\vartheta_i)}{\rho c f_i} \right\} \Delta t. \qquad (3.11)$$

În momentul $t = 0$, se cunosc toate valorile ϑ_i, deci ele pot fi calculate pentru momentul Δt. Se efectuează apoi calculele necesare, pentru deter-minarea cîmpului de temperatură și evoluția lui în timp.

Metoda elementelor finite [3.6] este o metodă matricială, care necesită un volum relativ mare de calcule, pentru care trebuie utilizat un calcula-tor electronic.

Piesa care se calculează se împarte în elemente de mărime finită. Aceste elemente sînt reprezentate de puncte nodale. Fiecare element este caracterizat de o anumită relație încărcare-deformație, din care rezultă rigiditatea, raportată, la nodul respectiv. Ansamblul punctelor nodale determină rigiditatea totală a piesei. Fiind date forțele exterioare, trebuie să se determine solicitările și deformațiile necunoscute din punctele no-dale. Luînd în considerare echilibrul forțelor și egalitatea deformațiilor de-a lungul laturilor comune ale elementelor, se obține un sistem de ecu-ații lineare, cu care se calculează necunoscutele.

Coeficientul de transfer de căldură. În cursul perioadelor tranzitorii de funcționare, coeficientul de transfer de căldură variază în măsură însemnată. Pentru determinarea lui este necesară cunoașterea condițiilor de curgere. Cazul cel mai complicat este cel al rotorului de turbină, de-a lungul căruia se produce o destindere a aburului, cu variația parametrilor aburului și a coeficientului de transfer de căldură.

Coeficientul de transfer variază aproximativ în raportul 3 : 1, între partea de intrare și cea de ieșire a turbinei și în raportul 8 : 1, între faza de demaraj și faza de plină sarcină [3.9].

Cîmpul de temperatură în materialul piesei studiate. Relații analitice pot fi stabilite numai în cazuri ideale, în care forma pieselor este simpli-ficată și redusă la forme geometrice regulate. Chiar și în aceste cazuri, volumul de calcule este important.

În realitate, forma pieselor este complicată, iar procesul de schimb de căldură este de asemenea complicat, atît prin variațiile locale ale tem-peraturii, cauzate de destinderea aburului, cît și prin variația coeficientu-lui de difuzivitate termică în funcție de temperatură. Cîmpul de tem-peratură se modifică în cursul proceselor tranzitorii. Astfel, la un rotor de turbină, izotermele au la începutul pornirii forma aproximativă a unor cilindri în jurul axei turbinei, iar la funcționarea staționară, în sar-cină, izotermele sînt aproximativ perpendiculare pe ax.

Solicitările. Așa cum s-a mai arătat, solicitările la care sînt supuse echipamentele sînt de natură mecanică (presiune, forță centrifugă, gra-vitație etc.) și de natură termică. Solicitarea totală este desigur o sumă a acestor solicitări. În cursul ciclurilor de încălzire-răcire, ele acționează în același sens sau în sens contrar și au în același timp o intensitate varia-bilă. Solicitările termice au o mărime redusă în regim staționar de func-

ționare, cînd solicitările mecanice sînt preponderente. În regim tranzitoriu, solicitările termice cresc foarte mult.

Efectul concentratoarelor de tensiuni poate fi luat în considerare în mod aproximativ prin coeficienți de concentrare sau prin calculul solicitărilor locale în aceste zone, cu ajutorul metodelor numerice de calcul.

Caracteristicile materialului. Solicitările efective se compară cu solicitările admisibile, care depind de material. Comparația se face atît la solicitarea statică de durată de fluaj, cît și la solicitarea dinamică ciclică de obosire. Nu există încă suficiente date experimentale privind interdependența acestor mărimi, avînd în vedere și efectul relaxării, astfel că se admit coeficienți de siguranță relativ mari. Calculul se face în scopul asigurării unei durate de viață la o anumită solicitare statică și pentru un număr dat de cicluri de sarcină.

În calcule, trebuie să se țină seama și de variația proprietăților materialului cu temperatura, în timpul proceselor tranzitorii, în special a limitei de curgere.

3.1.4. Elemente de calcul

Elementele de calcul prezentate în acest capitol au ca scop complectarea imaginei formate în capitolele anterioare asupra factorilor determinanți ai solicitărilor.

Dimensionarea tuburilor cu pereți groși sub presiune, încălzite, în regim staționar. Tuburile sub presiune se dimensionează la efortul unitar echivalent mediu $\sigma_{ech,\,m}$ produs de presiunea interioară. Efortul unitar echivalent se determină conform teoriei efortului unitar tangențial maxim [3.10] :

$$\sigma_{ech,\,m} = \sigma_{tm} - \sigma_{rm} = \frac{pd_i}{2sv_N} + \frac{p}{2}, \tag{3.12}$$

în care : σ_{tm} este efortul tangențial mediu ; σ_{rm} — efortul radial mediu ; p — presiunea interioară ; d_i — diametrul interior al tubului ; s — grosimea peretelui ; v_N — factor de influență a sudurii.

Efortul unitar echivalent mediu trebuie să fie mai mic sau cel mult egal cu efortul unitar admisibil $\frac{K}{S}$, în care K este caracteristica de rezistență a materialului (limita de curgere sau rezistența de rupere la fluaj, la temperatura de lucru), iar S este un coeficient de siguranță :

$$\sigma_{ech,\,m} \leqslant \frac{K}{S}. \tag{3.13}$$

Din relațiile (3.12) și (3.13) se obține formula cunoscută de la calculul cazanelor :

$$s = \frac{d_i p}{\left(2\frac{K}{S} - p\right) v_N}. \tag{3.14}$$

Grosimea peretelui este calculată pentru un efort unitar mediu. Calculul cu eforturi unitare medii este admisibil numai pentru materiale cu capacitate suficientă, de deformare adică materiale care pot prelua, prin curgere locală și fără fisurare, eforturile unitare maxime locale [3.11]. Prin aplicarea teoriei efortului unitar tangențial maxim, se ia în considerare ipoteza cea mai defavorabilă și anume egalitatea între eforturile unitare axial și tangențial. Teoria energiei de deformație pentru modificarea formei se bazează pe ipoteza cea mai favorabilă, în care efortul unitar axial are o valoare egală cu jumătate din valoarea efortului tangențial. Aplicarea teoriei energiei de deformație ar conduce la grosimi de perete ale țevilor cu 13% mai mici decît cele calculate pe baza teoriei efortului tangențial maxim. Aceasta din urmă este însă preferată, deoarece oferă o rezervă necesară, dacă se ține seama și de eforturile de natură termică [3.12]. Raportul între efortul maximal în secțiune și efortul mediu crește cu raportul diametrelor exterior și interior. Din motivul arătat, acest raport se limitează în general la valoarea 1,7.

În regim staționar de funcționare al țevilor de cazan, apar solicitări termice, care se adaugă la solicitările mecanice. Există o diferență de temperatură între suprafața exterioară și suprafața interioară a țevilor, produsă de schimbul de căldură între mediul exterior și cel interior. Țeava se verifică la deformare plastică și obosire la solicitare alternantă de frecvență coborîtă în fibra exterioară și în cea interioară a peretelui :

$$\frac{\sigma_{c,\,20^\circ C}}{S} \geqslant \frac{E_{20^\circ C}}{E_\vartheta}\,\sigma_{ech,\,\vartheta,\,m}, \tag{3.15}$$

în care : $\sigma_{c,\,20^\circ C}$ este limita de curgere la 20°C ; S — un coeficient de siguranță, pentru care se admite în general valoarea $S = 1,1$; $E_{20^\circ C}$ și E_ϑ — valorile modulului de elasticitate, la 20°C, respectiv la ϑ°C ; $\sigma_{ech,\,\vartheta m}$ — efortul unitar echivalent produs de presiune și deformație termică împiedicată.

Efortul unitar echivalent se poate calcula cu ajutorul relațiilor stabilite în [3.13].

Fenomenele de deformare plastică a fibrei celei mai solicitate impun limitarea grosimii peretelui la țevile de cazan. Astfel de exemplu se prescrie ca grosimea peretelui țevilor de cazan cu sarcină termică ridicată

(de ex. la o temperatură a gazelor de ardere mai mare decît 800°C) să nu depășească 6,3 mm [3.14].

Solicitări în tuburi izolate termic spre exterior, în regim cvasistaționar și în regim de șoc termic. Solicitările termice depind de diferențele de temperatură din peretele tubului. Acestea se pot determina cu ajutorul ecuației lui Fourier. Rezolvarea ei fiind foarte laborioasă, se admit pentru simplificare următoarele două cazuri: regim de încălzire cvasistaționar, în care viteza de variație a temperaturii agentului termic și aproximativ a fibrei încălzite este constantă, iar profilul curbei de variație a temperaturii în peretele tubului își păstrează forma, valorile variind proporțional; regim de șoc termic, în care temperatura agentului termic și aproximativ a fibrei încălzite variază brusc cu o anumită valoare.

În regim cvasistaționar, cu viteza de încălzire v_T constantă, ecuația Fourier ia forma:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial r} = \frac{v_T}{a}, \tag{3.16}$$

în care: ϑ este temperatura unei fibre a cilindrului; r — raza fibrei;
a — coeficientul de difuzivitate termică.

Notînd cu:

$\Delta\vartheta_m = \vartheta_m - \vartheta_i$ diferența de temperatură între fibra de temperatură medie și fibra interioară a peretelui;

$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_i$ diferența de temperatură între o fibră oarecare și fibra interioară ($\Delta\vartheta_e$ pentru fibra exterioară), se obțin prin integrare următoarele expresii pentru un tub cilindric [3.15]:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{v_T \cdot s^2}{a} \cdot \Phi_{Fi}, \tag{3.17}$$

$$\Delta\vartheta_m - \Delta\vartheta = \frac{v_T \cdot s^2}{a} \cdot \Phi_F, \tag{3.18}$$

în care Φ_{Fi} și Φ_F sînt factori de formă. Relațiile (3.17) și (3.18) sînt valabile pentru corpuri de orice formă. Pentru corpuri de formă geometrică regulată, s-au determinat expresii analitice ale factorilor de formă și relațiile de calcul a eforturilor [3.15, 3.16, 3.17]. Pentru corpuri de formă geometrică neregulată, se determină coeficientul de formă prin metode numerice de calcul.

Deformația termică împiedicată ε_t este mărimea care permite aprecierea solicitărilor termice. În cazul dilatării lineare

$$\varepsilon_t = \int_{\vartheta}^{\vartheta_m} \alpha(\vartheta) \cdot d\vartheta, \tag{3.19}$$

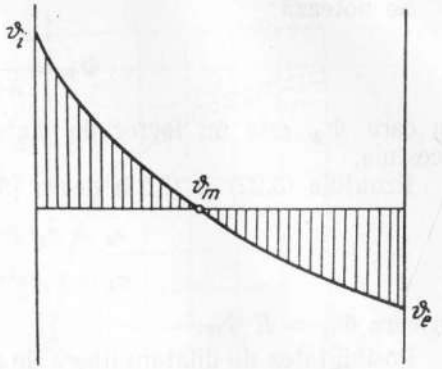


Fig. 3.13. Repartiția temperaturii într-un perete plan.

în care: ϑ_m este valoarea temperaturii finale a fibrei considerate; ϑ — temperatura inițială a fibrei considerate; $\alpha(\vartheta)$ — coeficientul de dilatare termică liniară, dependent de temperatură.

Dacă se introduce în calcul valoarea medie a coeficientului de dilatare termică, α, atunci în mod analog, în grosimea peretelui se produce în fibra de temperatură ϑ, față de fibra nedeformată de temperatură ϑ_m:

$$\varepsilon_t = \alpha \cdot (\vartheta_m - \vartheta) = \alpha \cdot (\Delta\vartheta_m - \Delta\vartheta). \tag{3.20}$$

Deformația fiind în plan, este valabilă expresia:

$$\varepsilon_t = \frac{\alpha}{1 - \nu} (\Delta\vartheta_m - \Delta\vartheta) \tag{3.21}$$

în care: ν este coeficientul lui Poisson, iar termenul $1 - \nu$ exprimă influența dilatării termice împiedicate bidimensional.

În fig. 3.13 este reprezentată repartiția temperaturii în peretele încălzit al unui echipament. Diferențele maxime de temperatură apar în general între fibra interioară, respectiv fibra exterioară și fibra de temperatură medie. Există momente în care temperatura maximă sau minimă poate fi localizată în interiorul peretelui, dar valoarea diferenței maxime de temperatură în acest caz este mai mică decît a diferenței maxime, care se produce în cursul procesului tranzitoriu între o fibră de margine și fibra de temperatură medie.

Din relațiile (3.17) și (3.21), rezultă pentru o fibră oarecare:

$$\varepsilon_t = \frac{\alpha}{a(1 - \nu)} \cdot v_T \cdot s^2 \cdot \Phi_F. \tag{3.22}$$

În domeniul elastic, există o relație lineară între deformația termică împiedicată și tensiunea termică:

$$\sigma_t = E \cdot \varepsilon_t = \frac{E \cdot \alpha}{a \cdot (1 - \nu)} \cdot v_T \cdot s^2 \cdot \Phi_F. \tag{3.23}$$

Se notează :

$$\Phi_W = \frac{\alpha}{a \cdot (1 - \nu)}, \tag{3.24}$$

în care Φ_W este un factor de material, care depinde de proprietăţile acestuia.

Ecuaţiile (3.22) şi (3.23) devin [3.15] :

$$\varepsilon_t = v_T \cdot s^2 \cdot \Phi_F \cdot \Phi_W ; \tag{3.25}$$

$$\sigma_t = v_T \cdot s^2 \cdot \Phi_F \cdot \Phi'_W, \tag{3.26}$$

în care $\Phi'_W = E \cdot \Phi_W$.

Posibilitatea de dilatare liberă de ansamblu a elementelor componente ale echipamentelor termomecanice este exprimată printr-un factor Φ_E, care se introduce în relaţiile (3.25) şi (3.26). Pentru carcasele de turbină, aceste relaţii devin [3.18] :

$$\varepsilon_t = v_T \cdot s^2 \cdot \Phi_F \cdot \Phi_W \cdot (1 - 3/4 \cdot \Phi_E) \text{ şi} \tag{3.27}$$

$$\sigma_t = v_T \cdot s^2 \cdot \Phi_F \cdot \Phi'_W \cdot (1 - 3/4 \cdot \Phi_E). \tag{3.28}$$

$\Phi_E = 0$, pentru o încastrare rigidă şi $\Phi_E = 1$, în cazul deformării libere. La turbinele cu abur, $\Phi_E = 0 - 0{,}8$.

În cazul şocului termic de temperatură ideal, $\Delta\vartheta_0$, există egalităţile :

$$\Delta\vartheta_m = \Delta\vartheta_e = \Delta\vartheta_0. \tag{3.29}$$

Din relaţia (3.21) rezultă, pentru fibra interioară :

$$\varepsilon_t = \frac{\alpha}{1 - \nu} \cdot \Delta\vartheta_0 = \Delta\vartheta_0 \cdot \Phi_{Ws}, \tag{3.30}$$

$$\sigma_t = \frac{E \cdot \alpha}{1 - \nu} \cdot \Delta\vartheta_0 = \Delta\vartheta_0 \cdot \Phi'_{Ws}, \tag{3.31}$$

în care :

$$\Phi_{Ws} = \frac{\alpha}{1 - \nu} \text{ şi } \Phi'_{Ws} = E \cdot \Phi_{Ws}.$$

Relaţiile prezentate au fost stabilite fără a ţine seama de faptul că coeficientul de convecţie termică α_t are o valoare finită. Pentru corecţia corespunzătoare, se utilizează un factor, f_a, care se determină în funcţie de raportul $\frac{\alpha_t s}{\lambda}$ (fig. 3.14) [3.15]. Astfel de exemplu, relaţia (3.31) devine :

$$\sigma_t = \Delta\vartheta_0 \cdot \Phi'_{Ws} \cdot f_a. \tag{3.32}$$

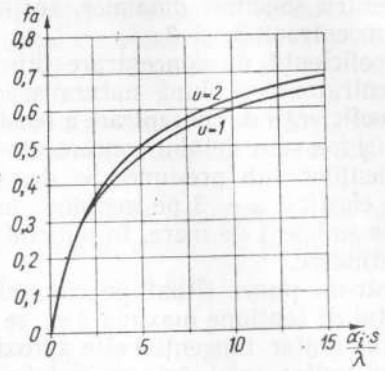


Fig. 3.14. Coeficientul de corecţie f_a [3.15].

Din relaţiile (3.25), (3.26), (3.30), (3.31) rezultă că efectele şocului termic depind foarte puţin de grosimea s a peretelui, dar că efectele încălzirii cu viteză constantă cresc cu pătratul grosimii peretelui. Deoarece grosimea peretelui creşte cu puterea nominală a unei turbine, mai ales la rotor, viteza admisibilă de modificare a temperaturii şi deci viteza de pornire şi de variaţie a sarcinei scad cu creşterea puterii nominale [3.19].

Solicitări în tuburi sub presiune interioară, în regim nestaţionar. Există cazuri în care procesul tranzitoriu nu poate fi asimilat cu un regim cvasistaţionar sau cu un şoc termic. Un exemplu este procesul care se produce la o modificare însemnată a temperaturii în intervalul de timp care trece pînă la atingerea regimului cvasistaţionar. Pentru asemenea cazuri şi pentru corpuri geometrice regulate au fost dezvoltate o serie de relaţii [3.20, 3.21, 3.22, 3.23]. Pentru corpuri geometrice neregulate este necesar să se utilizeze metode numerice.

Valoarea coeficienţilor de concentrare. În zonele concentratoare de tensiuni, solicitările cresc foarte mult. Această creştere se ia în considerare introducînd în relaţiile de calcul al solicitărilor factorii de concentrare a tensiunilor, α. Ţinînd seama şi de factorul de corecţie pentru coeficientul de convecţie, relaţiile (3.25), (3.26), (3.30), (3.31) devin pentru solicitări statice :

$$\varepsilon_t = \alpha_\varepsilon \cdot v_T \cdot s^2 \cdot \Phi_F \cdot \Phi_W \cdot f_a, \tag{3.33}$$

$$\sigma_t = \alpha_\sigma \cdot v_T \cdot s^2 \cdot \Phi_F \cdot \Phi'_W \cdot f_a, \tag{3.34}$$

$$\varepsilon_t = \alpha_\varepsilon \cdot \Delta\vartheta_0 \cdot \Phi_{Ws} \cdot f_a, \tag{3.35}$$

$$\sigma_t = \alpha_\sigma \cdot \Delta\vartheta_0 \cdot \Phi'_{Ws} \cdot f_a. \tag{3.36}$$

Pentru solicitări dinamice, se introduc în relații coeficienții efectivi de concentrare β_ε și β_σ.

Coeficienții de concentrare diferă ca valoare după forma detaliilor concentratoare și după natura solicitării, mecanică sau termică.

Coeficienții de concentrare a tensiunilor mecanice. În domeniul elastic, cel mai frecvent detaliu concentrator îl constituie orificiile din mantalele recipienților sub presiune. Se demonstrează că în domeniul de deformare elastică, $\alpha = 3$ pe marginea unui orificiu practicat într-o placă de lățime suficient de mare, în punctul de tangență cu direcția de solicitare la întindere.

Într-un punct situat pe circumferință, la un unghi de 90° față de punctul de tensiune maximă 3 σ_n, se produce un efort de compresie — σ_n. Efortul unitar tangențial este aproximativ de două ori mai mare decît efortul unitar axial, într-un recipient sub presiune. Efortul axial maxim este deci egal cu 1,5 σ_n, iar în direcția efortului tangențial maxim se exercită un efort negativ de compresiune de 0,5 σ_n. În direcția tangențială rezultă deci 3 σ_n — 0,5 σ_n = 2,5 σ_n, iar în direcția axială, 1,5 σ_n — σ_n = 0,5 σ_n (fig. 3.15).

Prin urmare, la întindere $\alpha'_{mec} = 2{,}5$, pentru un orificiu practicat într-o placă [3.24]. Această valoare se poate adopta și pentru mantaua unui cilindru de secțiune circulară.

Tuburile, a căror secțiune este ovală, tind să ia o formă circulară sub efectul presiunii interioare. Din acest motiv se produc eforturi de încovoiere, în direcția tangențială.

Ovalizarea secțiunii se întîlnește în primul rînd la coturile sistemelor de conducte. Secțiunea conductei se deformează în cursul procesului de încovoiere, raza de curbură a zonei comprimate și a zonei tensionate se mărește, iar raza de curbură a zonei neutre se micșorează. Sub acțiunea presiunii interioare, secțiunea ovală tinde să reia forma circulară, prin micșorarea razei de curbură a zonelor comprimată și tensionată și mărirea razei de curbură a zonei neutre. În acest fel apar eforturi unitare de încovoiere.

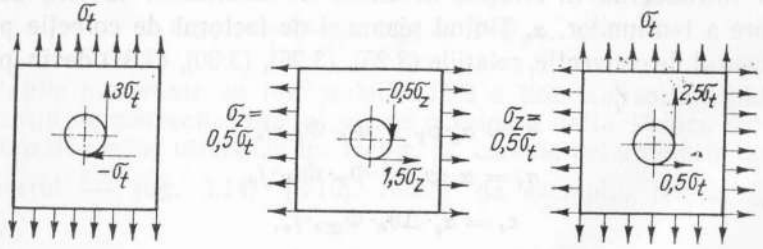


Fig. 3.15. Eforturi unitare la marginea unui orificiu [3.24].

Rezultatele obținute pe cale experimentală arată că în calcul trebuie luată ovalitatea medie de pe porțiunea de conductă aflată pe ambele părți ale secțiunii, la distanțe de cîte 1,5 ori diametrul și nu ovalitatea efectivă din secțiunea considerată [3.25].

Coeficientul de concentrare al efortului unitar de încovoiere α''_{mec}, la marginea unui orificiu practicat în peretele tubului, este de cel puțin 1,79 și crește cu grosimea peretelui.

Pentru calculul efortului unitar maxim la marginea unui orificiu practicat în peretele unui tub de secțiune ovală, se poate utiliza un coeficient de concentrare total, a cărui expresie este:

$$\alpha_{mec,\,t} = \alpha'_{mec} + \frac{\sigma_{nb}}{\sigma_{nt}}\,\alpha''_{mec}, \tag{3.37}$$

în care: σ_{nb} este efortul unitar nominal la încovoiere; σ_{nt} — efortul unitar nominal la întindere.

În fig. 3.16 sînt indicate valorile coeficientului $\alpha_{mec,\,t}$, pentru $\alpha'_{mec} = 2{,}5$ și $\alpha''_{mec} = 2{,}0$, în funcție de raportul d_i/s, în care d_i este diametrul interior al tubului și s, grosimea peretelui, avînd ca parametru ovalitatea, o:

$$o = \frac{2(d_{max} - d_{min})}{d_{max} + d_{min}} \cdot 100\%. \tag{3.38}$$

Coeficientul $\alpha_{mec,\,t}$ poate fi calculat cu relația:

$$\alpha_{mec,\,t} = \alpha'_{mec} + \frac{3}{2} \cdot \frac{\frac{d_m}{s}}{1 - \frac{1-\nu^2}{2E} \cdot p \cdot \left(\frac{d_m}{s}\right)^3} \cdot \frac{o}{100} \cdot 1{,}79. \tag{3.39}$$

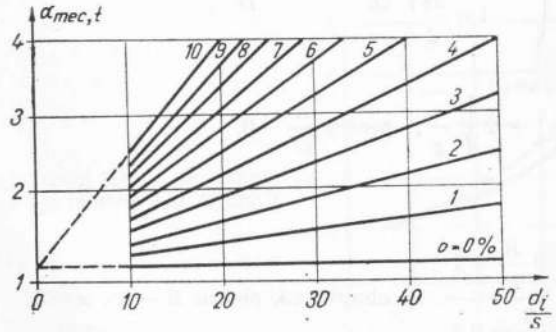


Fig. 3.16. Coeficientul de concentrare $\alpha_{mec,\,t}$ [3.24].

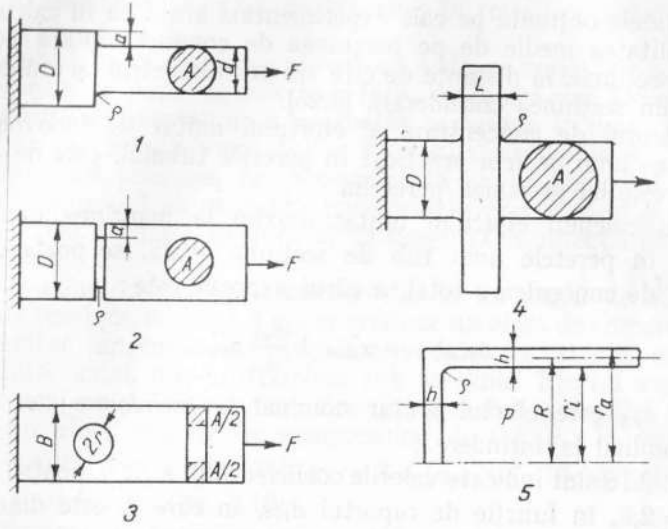


Fig.. 3.17. Detalii concentratoare de tensiuni [3.26].

Există relații stabilite pentru determinarea coeficienților de concentrare, în legătură cu diferitele tipuri de concentratoare de tensiune. Astfel de relații sînt indicate mai jos pentru concentratoarele de tensiuni din fig. 3.17 [3.26]:

1. $\frac{\sigma_{max}}{\frac{F}{A}} = \alpha = \begin{cases} 1 + 1{,}3\sqrt{\frac{a}{\rho}}, & \text{pentru } \frac{a}{D} \to 0. \\ 1 + \frac{0{,}645}{1 + \frac{2\rho}{d}}\sqrt{\frac{d}{2\rho}}, & \text{pentru } \frac{a}{D} \to 1. \end{cases}$

2. $\frac{\sigma_{max}}{\frac{F}{A}} = \alpha = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}$, pentru $\frac{a}{D} \to 0$.

3. $\frac{\sigma_{max}}{\frac{F}{A}} = \alpha = \frac{3\frac{B}{2r} - 1}{\frac{B}{2r} + 0{,}3}$. Se observă că, pentru $B \to \infty$, $\alpha = 3$.

4. $\frac{\sigma_{max}}{\frac{F}{A}} = \alpha = 1 + 0{,}5\sqrt{\frac{L}{\rho}}$, pentru $\frac{L}{D} \to 0$.

5. $\frac{\sigma_{max}}{\frac{\rho(r_a^2 + r_i^2)}{r_a^2 - r_i^2}} = \alpha \approx 1{,}11\sqrt[4]{\frac{R^2}{\rho \cdot h}} - 0{,}86$, pentru $500 \geqslant \frac{R^2}{\rho \cdot h} \geqslant 4$,.

Coeficienții de concentrare a tensiunilor termice în domeniul elastic. Pentru determinarea coeficientului de concentrare a tensiunilor termice, α_{th}, la marginea unui orificiu, se reia raționamentul privind coeficientul α'_{mec}. Se ține seama de faptul ca în cazul tensiunilor termice efortul unitar tangențial este egal cu efortul unitar axial. Efortul unitar rezultant este deci 3 $\sigma_n - \sigma_n = 2\sigma_n$. Rezultă $\alpha_{th} = 2$ [3.27].

Coeficienții de concentrare în domeniul plastic. În domeniul plastic, interesează coeficientul de concentrare α_ε (vezi fig. 3.3). Mărimea lui se determină pe cale experimentală. În fig. 3.18, este prezentată evoluția factorului $\varphi = \frac{\alpha_\varepsilon}{\alpha_k}$, în funcție de raportul dintre efortul unitar ideal total (mecanic + termic) și dublul limitei de curgere a materialului.

Verificarea solicitării efective și admisibile. Dimensionarea elementelor de echipamente termomecanice se face prin comparația efortului unitar mediu static cu efortul unitar admisibil obținut din rezistența de rupere la fluaj sau din limita de curgere, prin împărțirea cu un coeficient de siguranță.

În regimurile tranzitorii, cînd se produc eforturi termice de valoare ridicată, mai ales în zonele concentratoarelor de tensiuni, valoarea efortului unitar rezultant depășește efortul unitar de calcul.

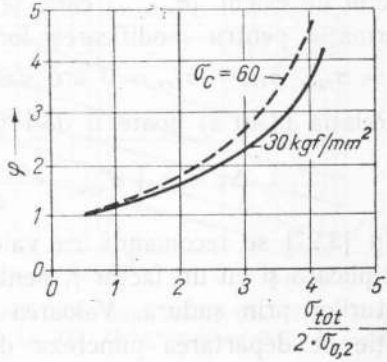


Fig. 3.18. Coeficientul efectiv de concentrare [3.27]. (1 kgf/mm² = 9,81 N/mm²).

Elementele de echipamente termomecanice se verifică la variația ciclică a acestor solicitări. Deformația totală efectivă în zona concentratoarelor de tensiuni se determină pe baza efortului unitar ideal mecanic, coeficientul concentrator mecanic în domeniul elastic, efortul unitar ideal termic, coeficientul concentrator termic în domeniul elastic, coeficientul efectiv concentrator de deformație în domeniul plastic.

Conform [3.28], la armăturile de cazane și conducte, se admite pentru calculul efortului unitar mecanic echivalent teoria efortului unitar normal maxim, pentru suprafețe în contact cu apa și teoria efortului unitar tangențial maxim, pentru suprafețe în contact cu aburul. Efortul unitar termic echivalent se calculează după teoria energiei de deformație pentru modificarea formei.

Deformația totală se calculează cu relația:

$$\Delta\varepsilon = \varphi \cdot \frac{\sigma_i}{E}, \tag{3.40}$$

în care σ_i este efortul unitar total ideal (fictiv).

După dezvoltarea părții din dreapta, se obține:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varphi}{E} \cdot (\alpha_{mec,\,t} \cdot \sigma_{ech,\,m} + \alpha_{th} \cdot \sigma_{ech,\,t}), \tag{3.40 a}$$

în care: $\sigma_{ech,\,m}$ este efortul unitar echivalent de natură mecanică, în punctul de calcul ($\sigma_{ech,\,m}$ are valori diferite, după cum se calculează pentru fibra interioară sau pentru fibra exterioară a peretelui. Așa cum s-a arătat, $\sigma_{ech,\,m}$ se calculează pentru fibra interioară după teorii diferite de rezistență, după cum punctul de calcul este în contact cu apă sau cu abur); $\sigma_{ech,\,t}$ — efortul unitar echivalent de natură termică în punctul de calcul ($\sigma_{ech,\,t}$, care se calculează după teoria energiei de deformație pentru modificarea formei, ținînd seama că $\sigma_{tti} = \sigma_{tzi}$, $\sigma_{tte} = \sigma_{tze}$, $\sigma_{tri} = \sigma_{tre} = 0$ are valoarea $\sigma_{ech,\,t} = \frac{\alpha \cdot \Delta\vartheta_m}{1-\nu}$).

Relația (3.40 a) poate fi deci scrisă sub forma:

$$\Delta\varepsilon = \varphi \cdot \left(\alpha_{mec,\,t} \cdot \frac{\sigma_{ech,\,m}}{E} + \alpha_{th} \cdot \frac{\alpha \cdot \Delta\vartheta_m}{1-\nu} \right). \tag{3.40 b}$$

În [3.27] se recomandă ca valoarea calculată a solicitărilor să fie multiplicată și cu un factor f, pentru luarea în considerare a influenței cusăturilor prin sudură. Valoarea factorului f este $f = 1{,}25 \ldots 1{,}4$, în funcție de depărtarea punctelor de calcul de cusăturile prin sudură.

Pentru diferitele mărci de oțeluri, se determină prin încercări relația între deformație, respectiv efortul unitar ideal-elastic și numărul de cicluri care produc fisurarea materialului, avînd ca parametru temperatura. Această relație este exprimată analitic în relația lui Manson [3.29]:

$$2\,\varepsilon_a = 3{,}5 \frac{\sigma_r}{E} N_a^{-0{,}12} + \left[\ln \left(\frac{100}{100 - \psi} \right) \right]^{0{,}6} \cdot N_a^{-0{,}6}, \tag{3.41}$$

în care: $2\,\varepsilon_a$ este amplitudinea totală a deformației, specifice ciclice, corespunzătoare numărului de cicluri N_a; N_a — numărul de cicluri, care produc fisurarea; σ_r — rezistența de rupere, la temperatura de lucru; ψ — contracția la rupere, în %.

În conformitate cu așa-numita regulă a celor 10%, se consideră admisibil un număr de cicluri egal cu 10% din N_a.

Rezultatele încercărilor efectuate asupra materialelor sînt cuprinse în diagrame ca aceea prezentată în fig. 3.19 pentru oțeluri aliate pînă la 5% Cr conform ASME Code Interpretations, Case 1331-4 [3.29]. Ele cuprind un coeficient de siguranță $S_N = 20$, față de numărul de cicluri N_a.

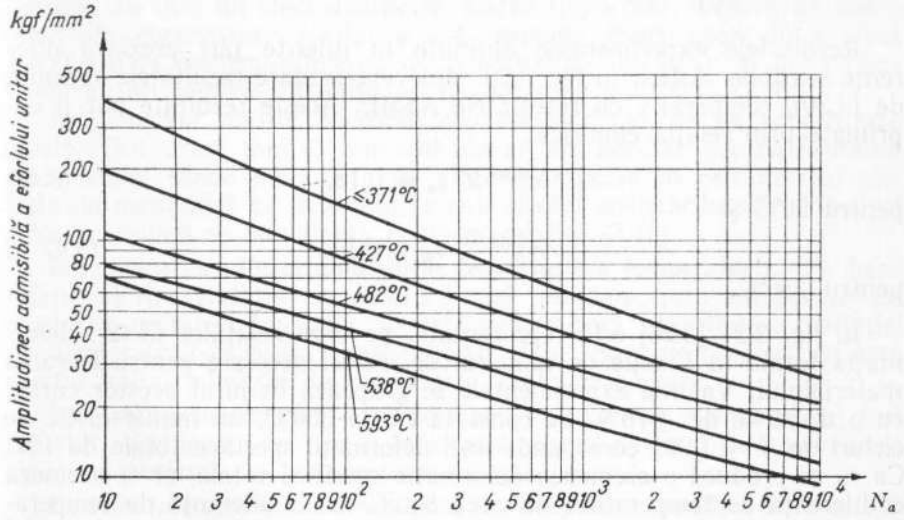


Fig. 3.19. Amplitudinea admisibilă a solicitării ciclice după ASME Code interpretations pentru oțeluri cu conținut de Cr pînă la 5%. (1 kgf/mm² = 9,81 N/mm²).

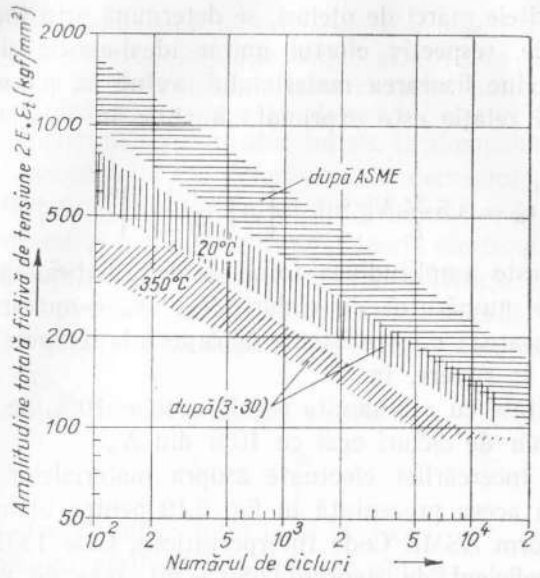


Fig. 3.20. Amplitudinea tensiunii oscilante în funcție de numărul critic de cicluri după Wellinger și ASME [3.30]. (1 kgf/mm² = 9,81 N/mm²).

Rezultatele experimentale obținute în diferite țări prezintă diferențe sensibile. Astfel, în fig. 3.20, sînt reprezentate rezultatele obținute de [3.30], comparativ cu rezultatele ASME. Aceste rezultate pot fi exprimate prin relația empirică:

$$N_a^{0,36} \cdot 2\ \varepsilon_a = 0{,}18, \tag{3.42}$$

pentru 20°C și

$$N_a^{0,36} \cdot 2\ \varepsilon_a = 0{,}14, \tag{3.42 a}$$

pentru 350°C.

În fig. 3.21 [3.26] este reprezentată, pe baza relațiilor (3.42), deformația totală în funcție de numărul de cicluri necesare pentru fisurarea materialului. Valorile experimentale se grupează în jurul acestor curbe, cu o dispersie de ±18%. Se constată că, la 350°C, un număr critic de cicluri de $N = 1\,000$ corespunde unei deformații specifice totale de 1%. Ca să se producă o asemenea deformație specifică totală, ar fi necesară o diferență de temperatură de circa 800°C. La o diferență de temperatură de 400°C, fisurarea s-ar produce după 7 000 cicluri. Se vede astfel că solicitările de natură termică practic nu pot produce fisuri într-o

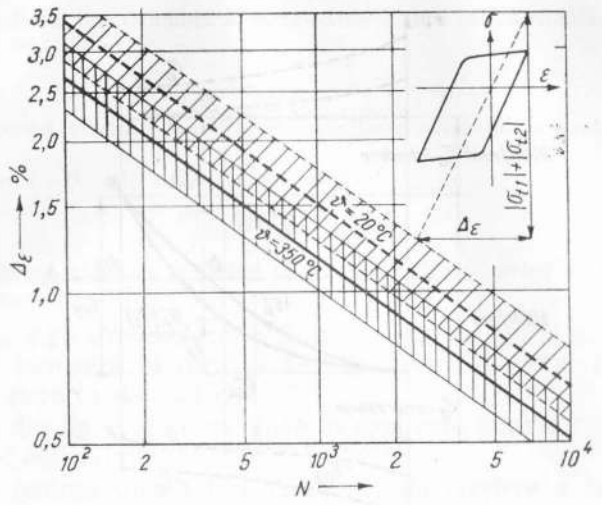


Fig. 3.21. Deformația totală în funcție de numărul critic de cicluri [3.26].

secțiune a peretelui, care nu cuprinde detalii geometrice concentratoare de tensiuni, chiar în condiții ciclice de solicitare. Concentratoarele de tensiuni au însă un efect distructiv foarte important. Pentru un coeficient de concentrare elastic $\alpha = 4$, primele fisuri apar după circa 1 000 cicluri, pentru diferențe de temperatură de 200°C și după circa 7 000 cicluri pentru diferențe de temperatură de 100°C [3.26].

În domeniul plastic, valoarea coeficienților efectivi de concentrare crește. Din acest motiv, numărul de cicluri necesar pentru fisurarea materialului scade mult față de valorile indicate în cele de mai sus. Este de menționat că deformațiile sub efectul solicitărilor termice și al celor mecanice se cumulează conform relației (3.40).

Determinarea vitezei admisibile de variație a temperaturii. Pe baza relației dintre variația temperaturilor și solicitare, prin comparație cu eforturile unitare admisibile, se determină viteza admisibilă a variației de temperatură în regim cvasistaționar și în regim nestaționar, în care efortul unitar admisibil la limită este limita de curgere.

Într-un calcul complet, este necesar să se verifice elementul cel mai solicitat. Verificarea se face la solicitarea statică de bază și la solicitarea ciclică alternantă, la temperatură ridicată.

La solicitare alternantă, trebuie să fie îndeplinite simultan trei condiții: amplitudinea totală a deformației specifice nu trebuie să depășească dublul deformației de curgere, $2\ \varepsilon_{0,2}$, dublul deformației admisibile față

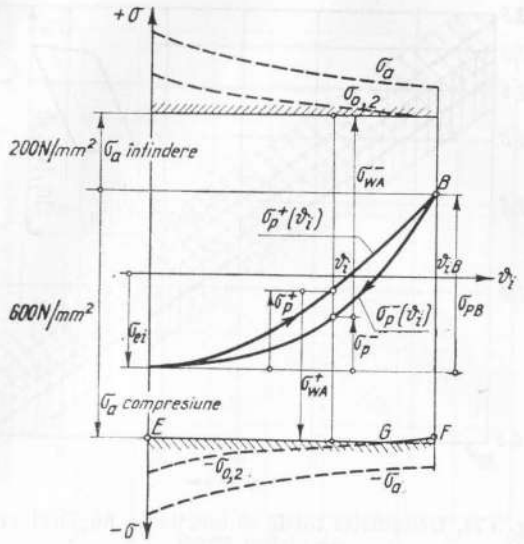


Fig. 3.22. Tensiuni termice admisibile pentru armături în contact cu apa [3.28].

de fisurare la solicitare alternantă, 2 ε_a și, pentru suprafețele în contact cu apa, suma deformațiilor corespunzînd deteriorării stratului de magnetită la întindere și respectiv la compresiune. Din încercări rezultă că, pentru un oțel cu limită de curgere de valoare ridicată și cu o rugozitate a suprafeței de 10 μm, stratul de magnetită se deteriorează la întindere la un efort unitar $\sigma_{m,\,i}$ de circa 200 N/mm², iar la compresiune la un efort unitar $\sigma_{m,\,c}$ de circa 600 N/mm², deci din acest punct de vedere amplitudinea totală a efortului nu trebuie să depășească 800 N/mm².

Modul de determinare a solicitării termice admisibile pentru un element în contact cu apa este arătat în construcția grafică din fig. 3.22 [3.28].

În intervalul E—G construcția figurii rezultă din egalitatea de bază, prezentată schematic în fig. 3.23, în care:

σ_{ei} este tensiunea internă remanentă (pozitivă), pe fibra interioară;

σ_p^+ — efortul unitar provenit din presiune, în timpul unei perioade de încălzire, pe fibra interioară;

σ_{ti}^+ — efortul unitar termic admisibil, în timpul procesului de încălzire, pe fibra interioară;

$\sigma_{0,2,\vartheta_i}$ — limita de curgere la temperatura de funcționare de regim;

σ_{a,ϑ_i} — efortul unitar admisibil la solicitare ciclică alternantă, la temperatura de regim

$$\sigma_{ei} + \sigma_p^+ + \sigma_{ti} = \sigma_{0,2,\,\vartheta_i} - \sigma_{m,\,i} + \sigma_{m,\,c}. \tag{3.43}$$

În acest interval, efortul este limitat de solicitarea admisibilă a stratului de magnetită.

În intervalul F—G, este valabilă egalitatea:

$$\sigma_{ei} + \overline{\sigma}_p^+ + \sigma_{ti} = -\sigma_{0,2,\,\vartheta_i}. \tag{3.44}$$

În acest interval, efortul este limitat de limita de curgere, avînd în vedere că aici $\vartheta_{0,2} < |\sigma_{0,2} - \sigma_{m,\,i} + \sigma_{m,\,c}|$.

Fig 3.22 și 3.23 sînt construite ținînd seama de faptul că stratul de magnetită se formează în condiții de funcționare (punctul *B*). În acest punct, el nu suportă nici un efort.

Diagrama din fig. 3.23 se modifică în mod corespunzător, dacă 2 $\sigma_{0,2}$ sau 2 $\sigma_{a,\,\vartheta_i} < 800$ N/mm².

Adoptînd ipoteza unei viteze constante de creștere a temperaturii mediului, se admite în calcul o aproximație. Pe de altă parte, calculul solicitărilor bazat pe fenomenul de transmitere a căldurii este complicat și legat de aproximații. De aceea, în unele lucrări, se recomandă calculul solicitărilor pe baza măsurării directe a temperaturii, atunci cînd aceasta este posibil [3.3, 3.26]. Se admite în acest caz o aproximație și anume, considerarea ca temperatură medie a temperaturii unei fibre din zona mediană a peretelui, în toate situațiile de funcționare. Se alege ca fibră de temperatură medie fibra situată la o distanță de 0,56 *s* de la fața neîncălzită a peretelui (*s* este grosimea peretelui) [3.31].

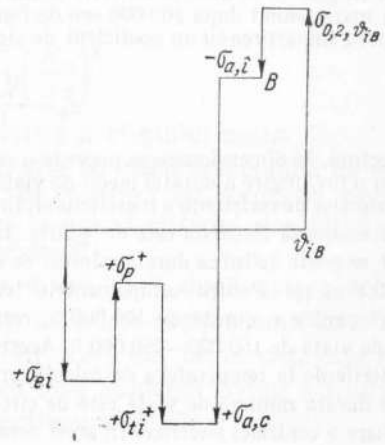


Fig. 3.23. Schemă auxiliară privind determinarea efortului unitar termic admisibil.

Durata de viață a elementelor componente ale echipamentelor termomecanice. Durata de viață a echipamentelor termomecanice este determinată de obosirea materialului. Obosirea este produsă prin fluaj, de solicitarea statică de bază și de solicitarea ciclică alternantă. Efectele lor se însumează conform regulei lui Palmgren și Miner. În conformitate cu aceasta, se divide durata totală de exploatare în intervale suficient de mici de funcționare, caracterizate prin efort unitar σ_i, temperatură ϑ_j și amplitudine de deformație $\Delta\varepsilon_k$. Se notează t_{ij} suma orelor de exploatare, în timpul cărora elementul de echipament a funcționat cu efortul unitar σ_i și temperatura ϑ_j. Se notează t_{Bij} durata de funcționare cu acest efort unitar și la această temperatură, pînă la rupere prin fluaj. Numărul de cicluri alternante, cu deformația totală $\Delta\varepsilon_k$, se notează cu N_k, iar numărul de cicluri pînă la rupere, cu N_{Bk}. Durata relativă de viață consumată de elementul de mașină este:

$$M = \sum_{ij} \frac{t_{ij}}{t_{Bij}} + \sum_{k} \frac{N_k}{N_{Bk}} . \tag{3.45}$$

În acest domeniu, nu există încă suficiente date experimentale. Au fost efectuate încercări combinate de rezistență la solicitare termică ciclică și la fluaj, modificînd ordinea de aplicare a celor două tipuri de solicitări. Într-o grupă de încercări, s-a aplicat întîi solicitarea termică ciclică, în altă grupă s-a început cu solicitarea de fluaj și în a treia grupă au fost alternate de mai multe ori cele două feluri de solicitări. Se constată că rezistența materialului depinde și de ordinea de aplicare a solicitărilor [3.32].

Durata de viață a echipamentelor solicitate la fluaj rezultă din modul de calcul al acestora. În general se admite un efort unitar de calcul σ_a, determinat din rezistența de rupere a materialului după 100 000 ore de funcționare, la temperatura de funcționare t, $\sigma^t_{r,\,10^5}$, prin împărțirea cu un coeficient de siguranță, a cărui valoare este de obicei 1,5.

$$\sigma_a = \frac{\sigma^t_{r,\,10^5}}{1{,}5}.$$

În consecință, la dimensionare se prevede o rezervă, care echivalează, în funcție de material, cu o prelungire a duratei medii de viață efective. O parte din rezervă acoperă dispersia valorilor de rezistență a materialului, în jurul valorii medii de calcul. Limitele între care se încadrează dispersia este de ±20%. Luînd în considerare limita inferioară a rezistenței, se poate defini ca durată minimă de viață a materialului durata care corespunde valorii $0{,}8\cdot\sigma_{r,\,10^5}$. Pentru echipamentele termomecanice calculate cu coeficient de siguranță pentru o durată de 100 000 h, rezultă, în funcție de marca oțelului, durate minime de viață de 150 000—250 000 h. Aceste valori sînt supuse corecțiilor, care derivă din devierile de la temperatura de calcul, care se produc în timpul funcționării. Se observă că durata minimă de viață este de circa 25 ani, adică practic egală cu durata de funcționare a centralei electrice. În acest context, în ultimul timp, a fost luată în consi-

derare adoptarea unor definiții noi pentru efortul unitar admisibil și anume valoarea $0{,}8\cdot\sigma^t_{r,\,2\cdot10^5}$ sau valoarea $0{,}8\cdot\sigma^{t+5}_{r,\,2\cdot10^5}$, adică ambele mărimi considerate la limita inferioară a domeniului de dispersie. Varianta $0{,}8\cdot\sigma^{t+5}_{r,\,2\cdot10^5}$ admite o creștere a siguranței, prin majorarea cu 5 grd a temperaturii de calcul, pentru a compensa inexactitățile de măsură. Din comparația celor trei variante, se constată că în general primele nu diferă mult între ele și că $0{,}8\cdot\sigma^t_{r,\,2\cdot10^5} \geqslant \frac{\sigma^t_{r,\,10^5}}{1{,}5} > 0{,}8\cdot\sigma^{t+5}_{r,\,2\cdot10^5}$. Există tendința să se adopte ca rezistență admisibilă mărimea $0{,}8\cdot\sigma^t_{r,\,2\cdot10^5}$.

Durata de viață este influențată, pe lîngă fluaj, și de caracterul oscilant al solicitărilor, care contribuie la obosirea materialului, de mărimea factorilor de concentrare a tensiunilor și de abaterile de funcționare de la valoarea nominală a temperaturii. De aceea durata de viață restantă trebuie să fie verificată în cursul exploatării instalațiilor. Modificările de structură a materialului, ca urmare a obosirii materialului, pot fi detectate în principiu prin determinarea comparativă a densității, a conductivității termice și electrice, a permeabilității și a altor proprietăți fizice, între o stare inițială etalon și starea constatată după o perioadă de funcționare. Aceste posibilități principale nu au putut fi încă valorificate în cadrul unor metode de verificare în exploatare a stării materialului.

Sfîrșitul duratei de viață poate fi caracterizat prin apariția unei fisuri a cărei lungime este critică, adică a cărei dezvoltare este spontană. Efortul unitar necesar pentru dezvoltarea spontană este:

$$K_1 = c\cdot\sigma\sqrt{a} \tag{3.46}$$

în care: c este o constantă; a — lungimea fisurii; σ — efortul unitar nominal normal pe planul fisurii.

Lungimea critică a fisurii este:

$$a_{crit} = \left(\frac{K_{1c}}{c\cdot\sigma}\right)^2, \tag{3.47}$$

în care K_{1c} este valoarea limită critică a efortului unitar.

Criteriul lungimii critice a fisurii este aplicabil domeniului de comportare linear-elastic al materialului. În legătură cu formarea unor zone mari de fisură în domeniul plastic, se aplică criteriul deplasării deschiderii fisurii (Crack Opening Displacement).

Viteza de dezvoltare a fisurilor diferă mult după natura solicitării, de exemplu între un ciclu alternant, întindere-compresiune, cum se produce efectiv la turbinele cu abur. În acest din urmă caz, este necesar un timp îndelungat pentru atingerea unei adîncimi critice a fisurii, care este în domeniul dimensiunii de centimetru [3.33].

3.1.5. Avarii produse de depășirea solicitărilor limită

Solicitări ciclice de frecvență coborîtă la cazane. Solicitările ciclice ale elementelor de echipament supuse la o presiune interioară au două componente, dintre care prima este caracterizată prin frecvență coborîtă și amplitudine mare iar a doua prin frecvență ridicată și amplitudine mică. Solicitarea de frecvență coborîtă este o consecință a proceselor tranzitorii de funcționare: modificări de sarcină, respectiv, la limită, porniri și opriri. Solicitarea de frecvență ridicată este generată, în cursul regimurilor staționare de funcționare, de variațiile de presiune și temperatură ale agentului de lucru. Perioada solicitărilor ciclice nu este constantă.

Ciclurile de solicitare cu amplitudine ridicată au în parte caracteristici (număr și amplitudine) previzibile, în cadrul proceselor tranzitorii controlate, determinate de programul de lucru al echipamentului. Ele se produc însă în mod necontrolat, atît ca număr, cît și ca amplitudine, în cadrul avariilor și defecțiunilor. Amplitudinea solicitărilor este determinată într-un punct dat în primul rînd de viteza de variație a parametrilor de funcționare, cazul limită fiind cel al șocului termic. Procesele tranzitorii controlate pot fi conduse astfel ca amplitudinea solicitării să fie limitată la o valoare minimă, în cadrul unei durate de desfășurare date. Un exemplu îl constituie pornirea unui cazan, cu viteză de creștere a presiunii constantă sau optimizată, astfel ca solicitarea termică să fie constantă (fig. 3.24). Din calculul efectuat pentru un caz dat, a rezultat un număr admisibil de 1 500 cicluri de solicitare pe durata de viață a cazanului, în cazul pornirii cu viteză constantă de creștere a presiunii și de 5 400 cicluri în cazul unui grafic optimizat de pornire [3.34].

În zonele concentratoarelor de tensiuni, se produc amplitudini locale maxime ale solicitărilor ciclice. Aici apar de regulă fenomene de defectare a materialului. La tambure apar fisuri, ca urmare a solicitărilor ciclice, în special în zonele concentratoare de tensiuni, de exemplu la marginea orificiilor practicate în mantaua lor.

În general, fisurile produse în exploatare la marginea orificiilor practicate în mantaua unui tambur se îndepărtează prin polizare. În multe cazuri, se constată că fisurile apar din nou în timpul exploatării și anume tot în zonele din care au fost eliminate. Din cercetările făcute [3.35], rezultă că tamburele cu grosimi de perete de circa 100 mm pot funcționa cu fisuri de 5—7 mm adîncime, în zonele concentratoare de tensiuni. Această concluzie se bazează pe constatarea că fisurile apar curînd după punerea în funcțiune a echipamentului și dezvoltarea lor se oprește după atingerea unei dimensiuni critice. Admiterea funcționării fără îndepărtarea lor trebuie făcută de la caz la caz, pe baza unor observații repetate în ceea ce privește evoluția lor.

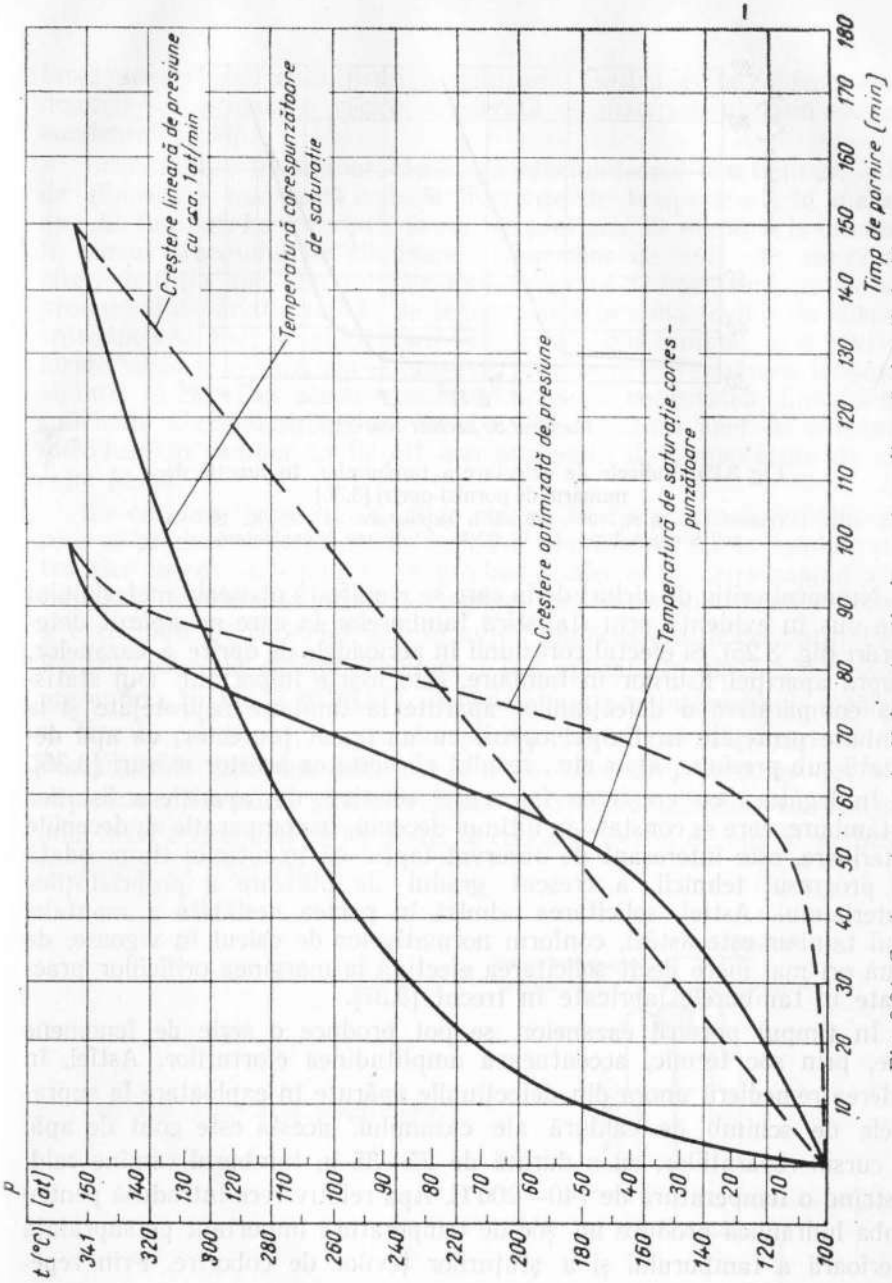


Fig. 3.24. Creșterea temperaturii de saturație, la creșterea liniară și optimizată a presiunii [3.34]. (1 at = 0,981 bar).

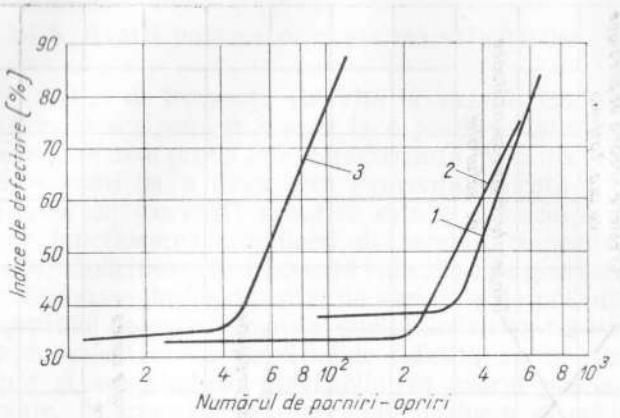


Fig. 3.25. Indicele de defectare a tamburelor, în funcție de numărul de porniri-opriri [3.36]

Oțeluri: 1 — 15 M, 100 — 120 mii h exploatare; *2* — 22 K, 20 — 80 mii h exploatare; *3* — 16 GNM, 5 — 40 mii h exploatare.

Numărul critic de cicluri de la care se manifestă oboseala materialului este pus în evidență prin statistica tamburelor la care au apărut deteriorări (fig. 3.25). Și efectul coroziunii în perioadele de oprire a cazanelor, asupra apariției fisurilor în tambure, este foarte important. Din statistica comparativă a defecțiunilor apărute la tambure neprotejate și la tambure protejate în timpul opririi cu un agent protector, ca apă degazată sub presiune, abur etc., rezultă eficacitatea acestor măsuri [3.36].

În legătură cu creșterea frecvenței relative de apariție a fisurilor în tambure, care se constată în ultimul deceniu, în comparație cu deceniile anterioare, este interesant de observat faptul că în ultimul timp, odată cu progresul tehnicii, a crescut gradul de utilizare a proprietăților materialului. Astfel, solicitarea admisă în partea neslăbită a mantalei unui tambur este astăzi, conform normativelor de calcul în vigoare, de două ori mai mare decît solicitarea efectivă la marginea orificiilor practicate în tamburele fabricate în trecut [3.37].

În timpul pornirii cazanelor, se pot produce o serie de fenomene care, prin șoc termic, accentuează amplitudinea eforturilor. Astfel, în vederea remedierii unora din defecțiunile apărute în exploatare la suprafețele de schimb de căldură ale cazanului, acesta este golit de apă. În cursul reparațiilor, cu o durată de 25—35 h, tamburul rămîne cald, păstrînd o temperatură de 140—200°C. Apa relativ rece introdusă pentru proba hidraulică produce un șoc de temperatură important pe suprafața interioară a tamburului și a știuțurilor țevilor de coborîre. Prin repe-

tarea acestui șoc, apar fisuri în știuțuri. Pentru evitarea fenomenului descris, s-a propus o răcire accelerată a materialului, prin răcire cu condensat [3.38].

Introducerea în tambur, deasupra nivelului apei din tambur, a apei de alimentare mai reci, creează diferențe de temperatură în masa de apă din tambur. La o variație bruscă de presiune, de exemplu la evacuarea în cursul procesului de eliminare a dopurilor de apă din supraîncălzitor, agitația apei din tambur uniformizează temperatura în masa ei, producînd o variație rapidă de temperatură în zona țevilor de coborîre. Introducerea apei de alimentare sub nivelul din tambur, prin țevi perforate dispuse pe întreaga sa lungime, previne în mare măsură fenomenul amintit [3.27]. Din aceste constatări, rezultă necesitatea dimensionării suficiente a economizoarelor, astfel ca temperatura apei de alimentare introdusă în tambur să fie cît mai apropiată de temperatura de saturație [3.39].

La cazanele încălzite cu abur străin, în timpul încălzirii din stare rece se produce o condensare intensă a aburului străin în tambur și un transfer intens de căldură. Se produce astfel o încălzire rapidă a metalului și o diferență mare de temperatură între suprafețele interioară și exterioară ale peretelui, aburul avînd temperatura de cel puțin 100°C. Pentru reducerea acestor solicitări, a fost aplicată în unele cazuri soluția prezentată în fig. 3.26 [3.27]. În prima parte a intervalului, încălzirea se face cu condensat, a cărui temperatură este crescută progresiv. Condensatul este introdus prin colectoarele inferioare, parcurge țevile de vaporizare, tamburul și este evacuat prin supraîncălzitor. La atingerea unui nivel convenabil de încălzire, se coboară nivelul de apă și se începe încălzirea cu abur străin.

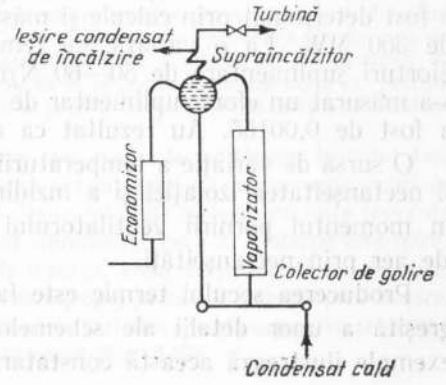


Fig. 3.26. Schemă de pornire [3.27].

În cursul avariilor, elementele cazanelor (în special tamburele și colectoarele) sînt supuse unor solicitări termice ridicate. Cea mai intensă variație de regim de funcționare la cazane o produce spargerea uneia sau mai multor țevi din sistemul de vaporizare. Prin scăderea bruscă a presiunii și temperaturii aburului, se produce o răcire intensă a metalului tamburului. Răcirea este accentuată prin antrenarea de apă pe suprafața acestuia, de către aburul vaporizat, ca urmare a scăderii de presiune în întregul sistem. Dacă spargerea se produce într-o perioadă de pornire, cînd apa de alimentare este mai rece, solicitarea este și mai mare. Variația de temperatură a putut fi măsurată pentru un asemenea caz, cu ocazia unei avarii produse întîmplător la un cazan supus unor măsurători speciale [3.40]. Spargerea unei țevi de ecran a produs în 4 min o scădere de presiune de la $p_a = 88$ bar la $p_a = 49$ bar, ceea ce a corespuns unei scăderi a temperaturii aburului saturat cu o viteză medie de circa 10°C/min.

Temperatura suprafeței interioare a tamburului în zona de legătură cu țevile de abur a scăzut cu circa 20°C/min, ceea ce se explică prin contactul cu apa de alimentare de circa 90—100°C, antrenată de aburul produs ca urmare a scăderii de presiune. Efortul echivalent mediu pe suprafața interioară a depășit limita de curgere. Și în supraîncălzitor a pătruns o cantitate de apă, atît prin antrenare, cît și prin închiderea întîrziată a ventilelor de pe injecția de apă pentru reglarea temperaturii. Efectul pătrunderii de apă a fost răcirea țevilor și colectoarelor, mai ales în prima etapă treaptă de supraîncălzire. În cazul dat, efortul unitar echivalent mediu nu a depășit limitele admisibile [3.41].

Declanșarea preîncălzitoarelor de înaltă presiune are ca efect o scădere cu circa 50°C a temperaturii apei de alimentare după economizor [3.34] și o solicitare termică a tamburului, care contribuie la obosirea materialului. Efectul șocului de temperatură produs de declanșarea preîncălzitoarelor de înaltă presiune asupra conductelor de apă de alimentare a fost determinat prin calcule și măsurători tensometrice pentru un bloc de 300 MW. La o variație de temperatură de 35°C/min, s-au produs eforturi suplimentare de 50—60 N/mm². După repunerea în funcțiune, s-a măsurat un efort suplimentar de 20—50 N/mm². Deformația maximă a fost de 0,00155. Au rezultat ca admisibile 10^5 cicluri [3.42].

O sursă de variație a temperaturii în peretele tamburului o constituie și neetanșeitatea izolației și a înzidirii. S-au constatat astfel de variații în momentul pornirii ventilatorului de gaze, ceea ce a creat curenți de aer prin neetanșeități.

Producerea șocului termic este favorizată de multe ori de concepția greșită a unor detalii ale schemelor sistemelor de conducte. Cîteva exemple ilustrează această constatare generală [3.43].

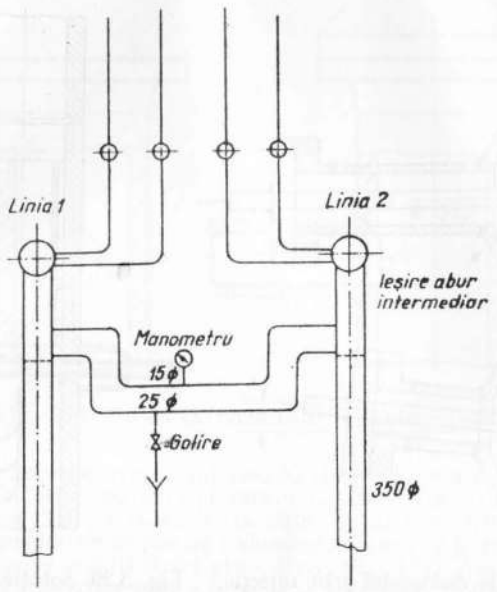


Fig. 3.27. Conducte auxiliare la ieșirea din supraîncălzitorul intermediar [3.43].

Exemplul 3.1. Cele două conducte de ∅ 350 mm de ieșire a aburului supraîncălzit intermediar dintr-un cazan erau legate printr-o conductă de măsură de ∅ 15 mm și o conductă de golire de ∅ 25 mm, fig. 3.27. În conductele de legătură, se forma condensat relativ rece care, la diferența de presiune dintre cele două conducte principale, se scurgea într-una dintre acestea, producînd un șoc termic în perete și formînd o fisură în locul respectiv. Prin desființarea conductei comune de golire și separarea conductei de măsură, s-a eliminat cauza defecțiunilor.

Exemplul 3.2. La injecția în aburul intermediar, s-au produs fisuri la 6 răcitoare, în zona indicată în fig. 3.28. Aici se produceau șocuri termice provocate de condensatul relativ rece venit în contact cu peretele fierbinte. Condensatul provenea fie din apa de injecție, fie din aburul condensat pe suprafața mai rece a țevii, în timpul pauzelor de injecție. Țeava fiind orizontală, condensatul putea să se prelingă pe suprafața ei. Soluția a constat în înclinarea țevii cu 5° și scurtarea ei pentru micșorarea suprafeței de condensare.

În special răcitoarele de abur prin injecție sînt expuse la șoc termic. În cazul desprinderii țevii de protecție, corpul de rezistență al răcitorului este supus unor șocuri de temperatură, la contactul direct cu apa de injecție. Sudurile de legătură între țeava de protecție și colector se rup adesea sub efectul vibrațiilor. Țeava de protecție este transportată de abur și se înțepenește, de obicei la o curbă, unde stînjenește fluxul de abur. Ea poate însă să rămînă sprijinită de țeava de injecție, pe care o slăbește prin frecare, pînă la spargere. Pentru detectarea din timp a unei avarii din această categorie, se prevăd în colector orificii pentru inspecția cu endoscopul (fig. 3.29).

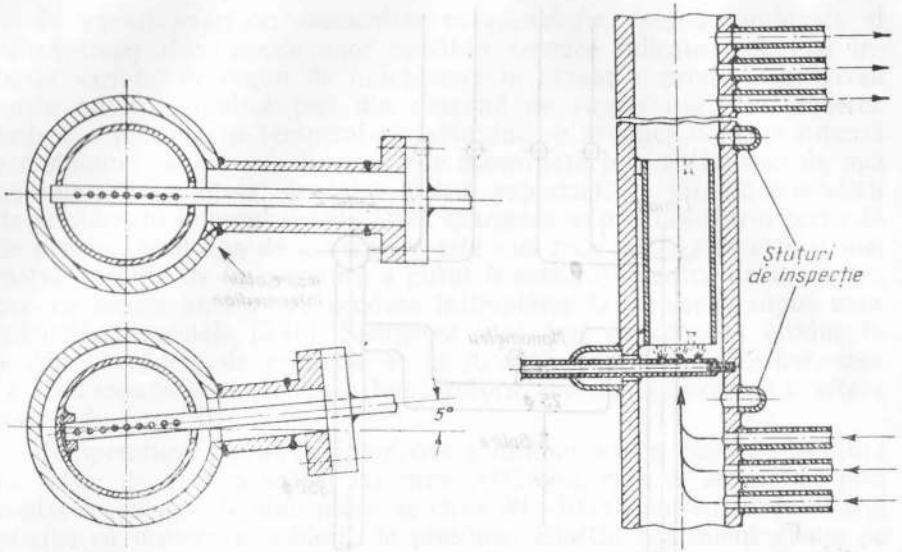


Fig. 3.28. Construcția răcitorului prin injecție, în soluție inițială și în soluție corectată [3.43].

Fig. 3.29. Soluție pentru ștuțuri de inspecție cu endoscopul [3.44].

Exemplul 3.3. Cazuri frecvente de șoc termic, agravate de prezența concentratoarelor de tensiuni, se produc în zonele derivațiilor din conductele principale. Astfel se produc fisuri pe marginile orificiilor de intrare a conductelor de încălzire, de impuls etc. Poziția fisurilor sugerează cauza probabilă, constituită de fenomene de condensare și vaporizare în perioadele de pornire și oprire, fig. 3.30 și 3.31 [3.26].

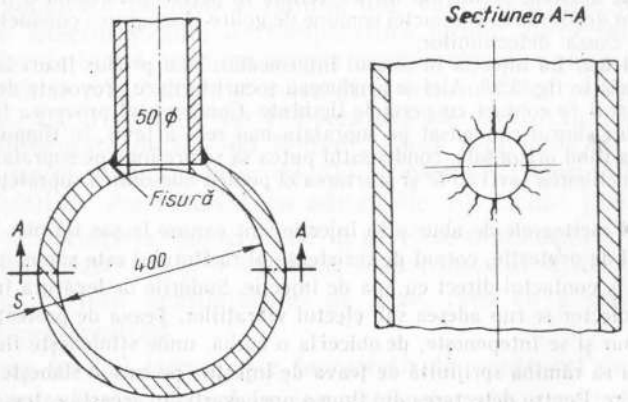


Fig. 3.30. Fisuri la ramificații verticale [3.26].

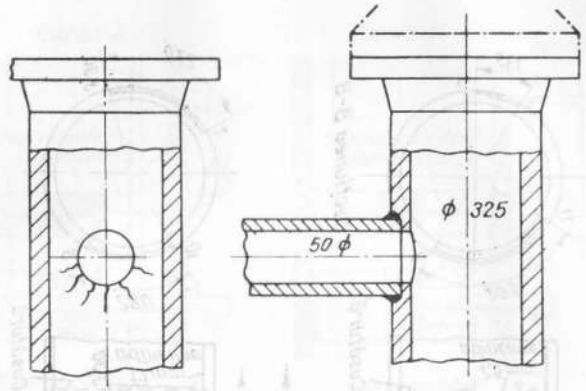


Fig. 3.31. Fisuri la ramificații orizontale [3.26].

Exemplul 3.4. Șocurile termice pot avea ca efect reducerea duratei de viață a materialelor, prin tensiunile remanente pe care le cauzează. Un astfel de caz s-a produs în piesa de legătură dintre colectoarele de ieșire ale supraîncălzitoarelor intermediare ale unor cazane și conductele de plecare a aburului intermediar [3.45]. Au fost constatate fisuri puternice în zona sudurii dintre piese și țevi (fig. 3.32). Aspectul metalografic al zonei fisurate era caracterizat prin micropori și microfisuri la limita granulelor, ceea ce a evidențiat drept cauză a fisurilor depășirea rezistenței de durată a materialului. Totuși, acesta nu funcționase pînă la apariția fisurilor decît timp de circa 20 000 h. După excluderea pe bază de calcule și măsurători a altor cauze posibile, s-a detectat pe bază de măsurători ample cauza reală a defecțiunii. În cursul manevrelor de pornire a blocului se producea un șoc de temperatură de circa 260°C, în zona de intrare a două țevi de supraîncălzitor în colectorul de ieșire a supraîncălzitorului intermediar. Șocul era produs de apă, provenită de la răcitoarele prin injecție la începerea admisiei aburului în turbine. În această perioadă, se produce o reducere temporară, dar masivă, a debitului de abur prin supraîncălzitoarele intermediare. Apa injectată în același timp în regulatoarele de temperatură nu se evaporă decît parțial, în special în țevile amplasate lîngă peretele încă mai rece al drumului de gaze și se acumulează în zona inferioară a ultimei părți a supraîncălzitorului intermediar, parcursă de abur în sens ascendent (fig. 3.33). La creșterea debitului de abur, se creează o cădere suficientă de presiune în partea de ieșire a supraîncălzitorului, pentru expulzarea dopului de apă. Apa intră în contact cu circa o șesime din circumferința colectorului, unde produce o contracție puternică iar în restul de cinci șesimi ale circumferinței se produc tensiuni. La valoarea diferenței de temperatură din cazul relatat, s-a produs o deformație plastică, care după egalizarea temperaturilor a generat un efort remanent de compresiune, în zona supusă șocului și un efort remanent de întindere, în restul circumferinței. Tensiunea remanentă de întindere generată de șocul termic, împreună cu tensiunea generată de presiunea interioară, cu tensiunea remanentă din sudură și amplificată prin modificarea grosimii peretelui din zona sudurii, s-au compus într-o rezultantă, mult superioară valorii de calcul. Durata de viață corespunzătoare valorii rezultantei era de circa 20 000 h pentru materialul piesei.

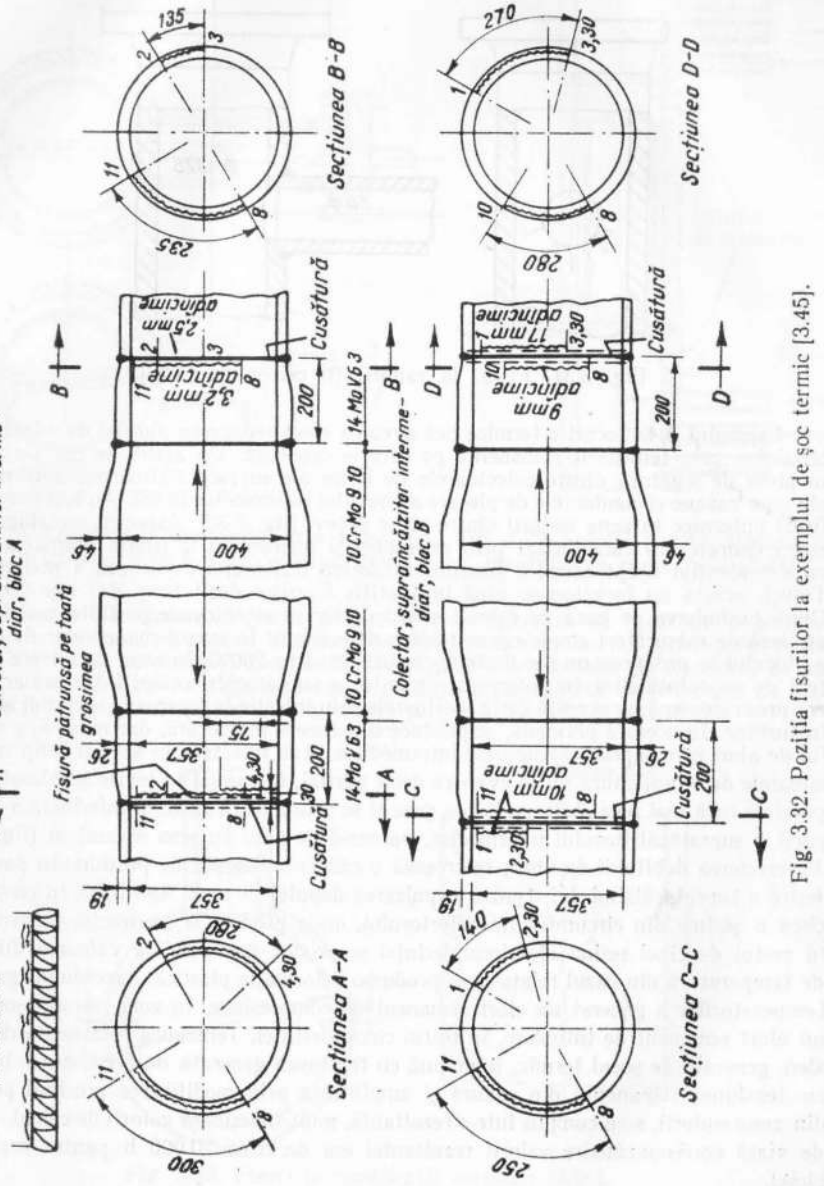


Fig. 3.32. Poziția fisurilor la exemplul de șoc termic [3.45].

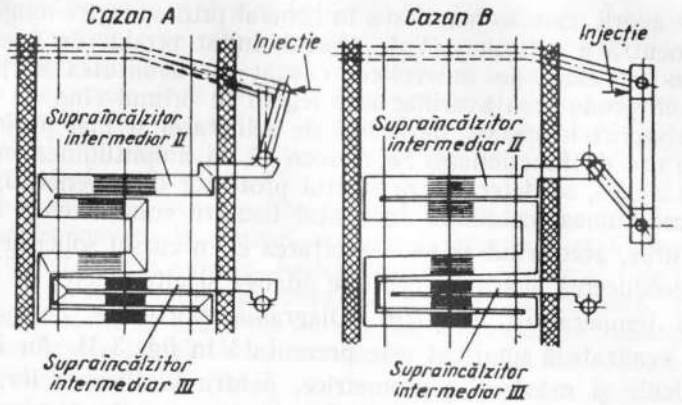


Fig. 3.33. Cauza constructivă a producerii unui șoc termic [3.45].

Depășirea temperaturilor nominale. Prin depășirea temperaturilor nominale de funcționare, se reduce durata de funcționare a materialului.

Exemplul 3.5. [3.67]. La cazanele unei centrale, s-au produs spargeri de țevi la partea inferioară a zonei de radiație a cazanelor. Au fost constatate două grupe caracteristice de defecțiuni. În prima grupă, s-au constatat măriri de diametru și subțierea peretelui țevilor în zonele de spargere, localizare pe fața țevilor orientată spre flacără. Țevile au suferit încălziri locale, având ca efect deformarea lor și apoi ruperea. La manifestarea defectului, se scurge prin spărtură un debit însemnat de fluid, care răcește materialul. În zona spargerii, s-au măsurat durități de 240–260 HB, față de valori normale de 140–160 HB. Cauza supraîncălzirilor locale a fost valoarea redusă a debitului masic al fluidului și anume 1 200–1 350 kg/m²·s. Prin măsuri de reconstrucție a suprafețelor de încălzire, a fost mărit fluxul de masă prin țevi la 2 400–2 700 kg/m²·s și într-o anumită zonă la 3 600 kg/m²·s.

În grupa a doua de țevi defectate, s-au constatat ruperi fragile, cu deformație mică a țevii și reducere mică a grosimii peretelui țevilor. Cauza defectării țevilor a fost depunerea de oxizi de fier, mai ales în zona bavurilor. În urma producerii avariilor, s-a hotărît spălarea acidă a cazanelor la intervale de 3–4 mii ore de funcționare. În zonele periculoase, s-au montat țevi din oțel de calitate mai bună.

Exemplul 3.6. [3.68]. La un tip de cazane, s-au produs repetate avarii, ca urmare a depășirii temperaturei nominale de funcționare, la treapta convectivă finală a supraîncălzitoarelor. Două soluții au fost verificate prin reconstrucția unor cazane. Prima soluție a constat din reducerea suprafeței de schimb de căldură, iar a doua soluție a constat în divizarea treptei în două jumătăți montate în serie, în care viteza aburului a fost dublată.

Concentratoare de tensiuni la cazane. Defecțiunile, respectiv fisurile, apar în material ca urmare a factorilor de influență (§ 3.1.2), ale căror acțiune cumulată produce o solicitare locală maximă, care se amplifică în timp. Un caz tipic îl constituie coturile țevilor neîncălzite ale cazanelor [3.37, 3.46, 3.47, 3.48]. La aceste piese, se localizează un număr

ridicat de avarii, care se manifestă în general prin spargeri longitudinale în zona neutră a coturilor. Peste efortul unitar produs de presiune, se suprapune un efort de încovoiere, cauzat de ovalitatea secțiunii. Se constată că producerea avariilor este legată în primul rînd de numărul de porniri-opriri (respectiv de cicluri de solicitare) și mai puțin de numărul de ore de funcționare. Se deduce că, la amplitudinea maximă a solicitării ciclice, se deteriorează stratul protector de magnetită, ceea ce inițiază coroziunea metalului. Începutul fisurării concentrează la rîndul său eforturile, accelerînd astfel dezvoltarea ei în cursul solicitării ciclice, pînă la producerea avariei. Uneori se adaugă și alte efecte, de exemplu depășirea temperaturii de lucru. Diagrama eforturilor pe perimetrul secțiunii ovalizate a unui cot este prezentată în fig. 3.34. Au fost efectuate calcule și măsurări tensometrice, pentru verificarea lor. Trebuie să se ia în considerare faptul că ipotezele de calcul bazate pe o formă

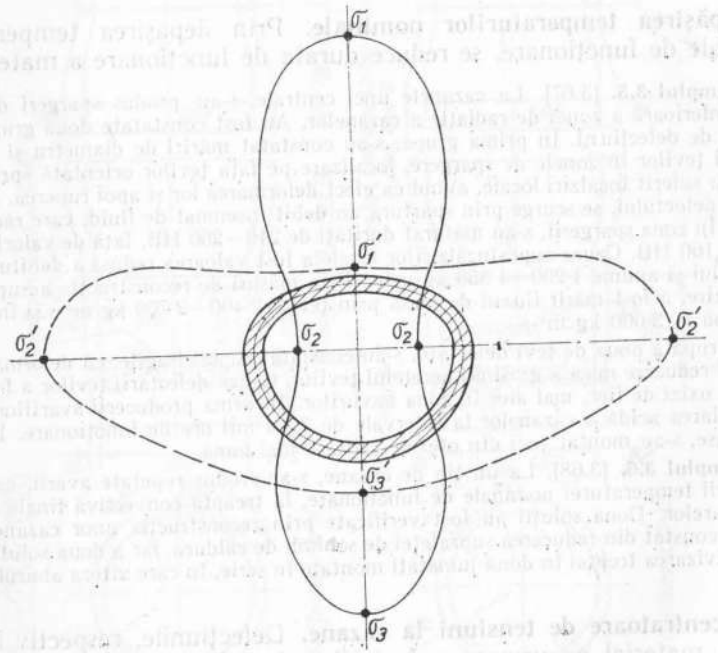


Fig. 3.34. Distribuția tensiunilor periferice pe suprafețele unui cot de țeavă [3.46]:
_____măsurări tensometrice pe suprafața exterioară a cotului țevii;
– – – – valori calculate ale tensiunilor pe suprafața interioară a cotului cu luarea în considerare a tensiunilor pe suprafața exterioară.

ovală (geometrie regulată) sînt incomplete, deoarece în realitate forma secțiunii deformate este mai complicată. În general, peretele supus întinderii se aplatizează, adică raza de curbură a acestei porțiuni a cotului este mai mare decît se admite în calcul și efortul este mai mare.

Prin calcule exacte au fost determinate eforturi care depășesc pe cele de calcul; într-un caz practic, efortul efectiv a depășit de cinci ori efortul de calcul.

Pentru prevenirea avariilor, se propun, ținînd seama de cele arătate, metode suplimentare de control înainte de montare și limite privind abaterile dimensionale admise. Astfel, pentru țevi cu diametre de 108—426 mm, se recomandă valoarea maximă a razei de curbură, grosimea maximă a peretelui și uzura maximă a dispozitivului de îndoire, pentru a limita ovalizarea [3.46]. A fost construit un aparat de măsură a aplatizării peretelui coturilor [3.47].

În zonele fisurilor, analizele metalografice au scos în evidență separări de carburi la limita granulelor și un conținut de molibden segregat aproape dublu față de zonele nefisurate. În zonele din jurul fisurii se constată o densitate de pori mult mărită față de zonele nedefectate (într-un caz 546 buc/mm², față de 26 buc/mm², la 20 mm distanță). Este de menționat că valorile rezistențelor în porțiunile defecte, determinate la 20°C, se încadrează în general în norme.

Solicitări ciclice de frecvență coborîtă la turbine. Atît carcasele, cît și rotoarele turbinelor sînt supuse unor solicitări statice, din care principalele sînt presiunea interioară la carcase și forța centrifugă la rotoare, peste care se suprapune solicitarea ciclică de frecvență coborîtă. Solicitările maxime în cursul proceselor tranzitorii se produc în rotoare la turbinele de mare putere. Solicitările în carcasele acestor turbine sînt limitate, prin construcția cu pereți dubli sau de tip oală. Vitezele admisibile de încălzire sînt prin urmare limitate de solicitările termice în rotor [3.19, 3.49]. Față de metodele utilizate de calcul simplificat al solicitărilor și anume echivalarea rotorului cu un cilindru lung sau cu un disc, metode exacte de calcul dau rezultate sensibil diferite [3.49]. În zonele de concentrare a tensiunilor de pe suprafața rotorului, pot să apară în timpul încălzirii importante deformații plastice de compresiune, generînd tensiuni remanente de întindere, care acționează în regim staționar și reduc durata de viață a materialului. Ipotezele de calcul, care admit cicluri de solicitare unitare, diferă de condițiile efective de funcționare. În realitate, ciclurile de solicitare sînt de două categorii și anume prima de frecvență coborîtă, legată de manevrele de pornire-oprire, iar a doua, secundară, de oscilațiile de sarcină și temperatură. Se propune calcularea și cumularea obosirii materialului, produsă prin solicitare ciclică și prin solicitare statică, la temperatura maximă a ciclului și limitarea valorii obținute cu coeficientul 0,6 [3.50].

Exemplul 3.7. La o turbină de 50 MW, supusă unui număr mare de porniri, s-au descoperit fisuri pe ax, în zona etanşării, într-un nut de descărcare, cu rază de curbură mică. Pentru remediere şi prevenire, s-a strunjit axul în zona în care s-a produs fisura precum şi în alte două concentratoare de tensiuni, realizînd raze de curbură mai mari, (fig. 3.35). Fisuri similare sînt prezentate în fig. 3.36 [3.51].

S-au putut constata fisuri şi în zonele concentratoare de tensiuni, de exemplu nervuri ale carcaselor exterioare şi interioare şi ale cutiilor de intrare a aburului (fig. 3.37)

Defectele de turnare constituie de asemenea concentratoare de tensiuni. Lucrări de separaţie sau eliminare prin sudură a defectelor unei piese turnate sînt astăzi posibile, cu condiţia respectării unor reguli de bună execuţie şi anume: utilizarea unor electrozi din material potrivit, absenţa oricărei fisuri în cusătură, pretratare termică adecvată şi menţinerea piesei în timpul sudurii la temperaturi de 200—400°C, efectuarea sudurii pînă la rădăcina defectului şi cu exces peste suprafaţa piesei, îndepărtarea stratului în exces, respectarea graficului de răcire prescris, după terminarea lucrării. În cazul nerespectării acestor reguli generale, se produc noi defecţiuni, după o anumită perioadă de funcţionare.

Exemplul 3.8 [2.3]. La o turbină, a fost detectată o fisură în cutia ventilelor de reglaj. Defectul a fost înlăturat prin sudură. După o perioadă de funcţionare, au apărut fisuri în zona sudurii. În zona de tranziţie a cusăturii prin sudură, s-a măsurat o duritate de 3 920 N/mm², faţă de 2 250 N/mm² în materialul de bază. Cauza acestei situaţii a constituit-o lipsa de tratament termic după efectuarea sudurii. Zona de tranziţie cu capacitate redusă de deformare nu a putut rezista solicitărilor din exploatare. Imaginea metalografică era caracterizată printr-o puternică separare de carburi.

Obosirea ciclică a rotorului poate fi provocată şi de o dezechilibrare accidentală, produsă de exemplu de ruperea unor palete sau a unui fragment de disc. Apar forţe periferice neuniforme, de cîteva ori mai mari decît greutatea rotorului. Forţele suplimentare de încovoiere apropie de limita de curgere solicitarea materialului. În zonele de concentrare a tensiunilor, se produc fisuri de obosire la solicitare ciclică [3.60]. O avarie, în care o turbină a fost distrusă, în urma ruperii axului în cinci secţiuni, s-a produs din cauzele arătate în centrala Hinkley Point.

Un mare număr de turbine cu abur funcţionează la sarcină parţială şi chiar la pornire cu presiune fixă la admisie a aburului şi cu reglaj prin admisie parţială.

Acest mod de funcţionare se caracterizează prin variaţii de temperatură în corpul de înaltă presiune, în timpul pornirilor şi a variaţiilor de sarcină, care generează o solicitare termică ciclică a materialului. De asemenea, din cauza admisiei parţiale, paletele din treapta de reglaj sînt supuse unor însemnate eforturi dinamice de frecvenţă ridicată. Şi ajutajele primei trepte sînt supuse unor solicitări ridicate. Amplitudinea vibraţiilor paletelor din ultima treaptă creşte din cauza abaterii

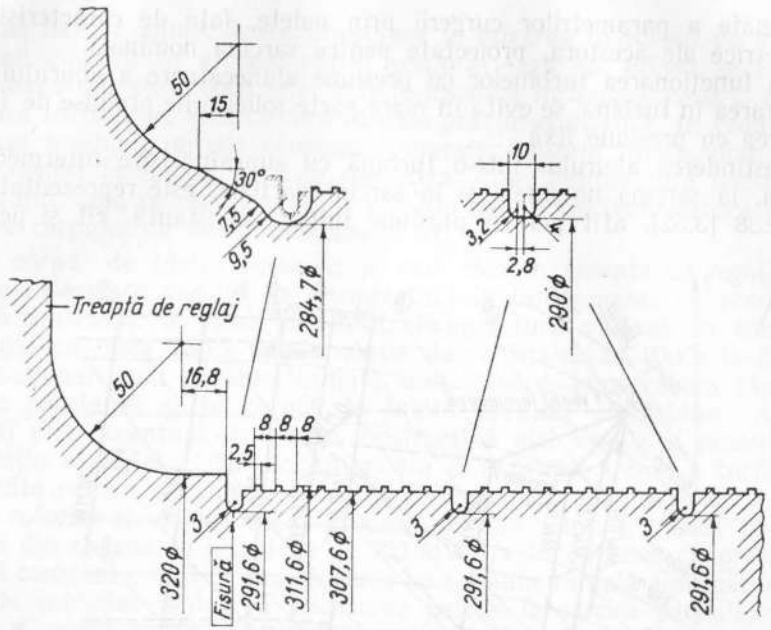


Fig. 3.35. Modificări la nutul de descărcare [3.26].

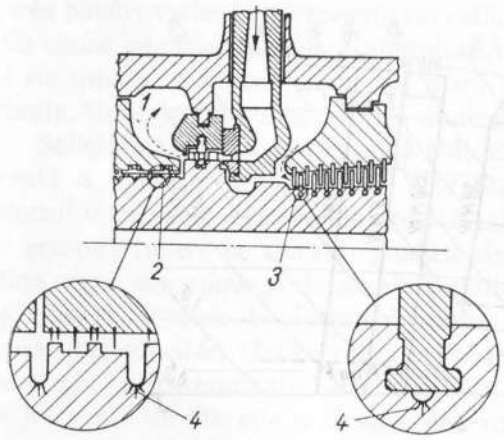


Fig. 3.36. Fisuri la o turbină [3.26]:
1 — camera treptei de reglaj; *2* — labirint de înaltă presiune; *3* — rădăcina unei palete de înaltă presiune; *4* — fisuri.

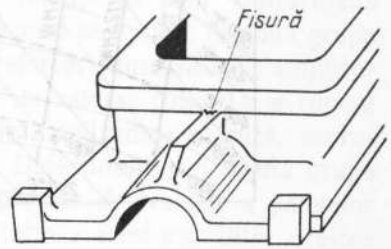


Fig. 3.37. Fisură în cutia de admisie [3.26].

însemnate a parametrilor curgerii prin palete, față de caracteristicile geometrice ale acestora, proiectate pentru sarcina nominală.

La funcționarea turbinelor cu presiune alunecătoare a aburului viu la intrarea în turbină, se evită în mare parte solicitările produse de funcționarea cu presiune fixă.

Destinderea aburului într-o turbină cu supraîncălzire intermediară simplă, la sarcină nominală și la sarcini parțiale, este reprezentată în fig. 3.38 [3.52], atît pentru presiune inițială constantă, cît și pentru

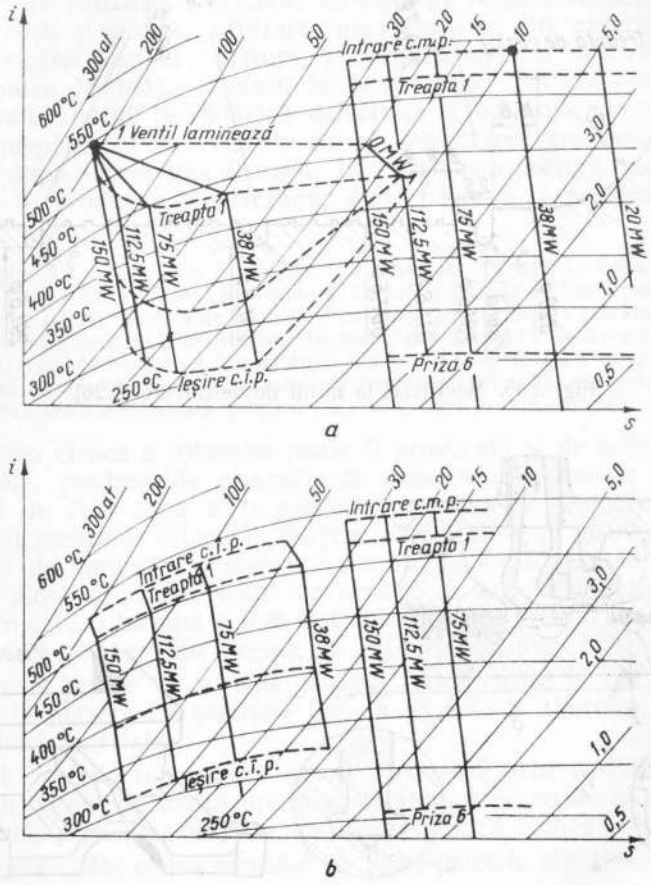


Fig. 3.38. Destinderea într-o turbină de 150 MW, cu supraîncălzire intermediară, la diferite sarcini [3.52]:
a — presiune fixă; *b* — presiune alunecătoare. (1 at = 0,981 bar).

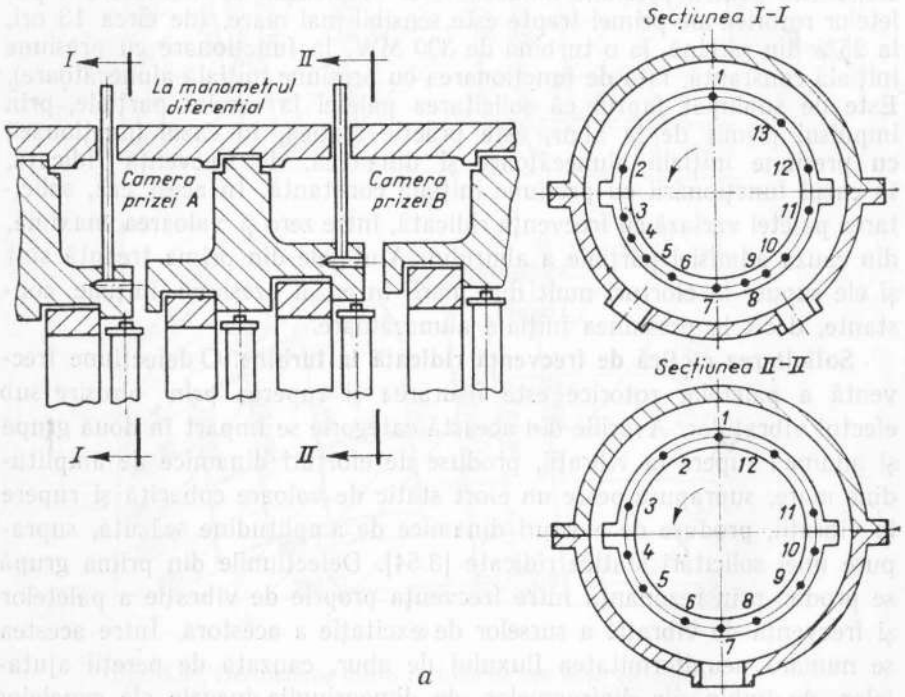
presiune inițială alunecătoare. Presiunea la intrarea în corpul de medie presiune glisează în ambele cazuri conform legii lui Flügel, astfel că destinderea din acest corp este teoretic identică în ambele cazuri. Temperatura în treptele acestui corp rămîne practic constantă. În realitate, în cazul presiunii inițiale constante, supraîncălzitorul intermediar nu poate realiza la sarcini parțiale sub circa 70%, temperatura nominală a aburului, ceea ce are ca efect o variație redusă de temperatură și în treptele corpului de medie presiune [3.53].

În corpul de înaltă presiune și mai ales în treapta de reglaj, se produc însemnate variații de temperatură la funcționarea cu presiune inițială constantă. În cazul prezentat, temperatura variază în treapta de reglaj cu circa 75°C, la o variație de sarcină de la 100% la 25%. La funcționarea cu presiune inițială alunecătoare, temperatura rămîne practic constantă și în corpul de înaltă presiune al turbinei. Acest avantaj este accentuat de forma constructivă mai simplă și necesitînd mai puțin material a carcasei interioare și a primei trepte a turbinei, construite pentru presiune alunecătoare. Momentul de încovoiere a paletelor rotorice ale primei trepte este sensibil mai mare, (de circa 13 ori, la 25% din sarcină, la o turbină de 300 MW, la funcționare cu presiune inițială constantă, față de funcționarea cu presiune inițială alunecătoare). Este de subliniat faptul că solicitarea paletei la sarcini parțiale, prin impulsul primit de la abur, este practic statică, în cazul funcționării cu presiune inițială alunecătoare și dinamică, de frecvență ridicată, în cazul funcționării cu presiune inițială constantă. În acest caz, solicitarea paletei variază cu frecvența ridicată, între zero și valoarea maximă, din cauza admisiei parțiale a aburului. Ajutajele din prima treaptă sînt și ele supuse la eforturi mult mai mari, în cazul presiunii inițiale constante, decît la presiunea inițială alunecătoare.

Solicitarea ciclică de frecvență ridicată la turbine. O defecțiune frecventă a paletelor rotorice este fisurarea și ruperea prin obosire sub efectul vibrațiilor. Avariile din această categorie se împart în două grupe și anume: rupere la vibrații, produse de eforturi dinamice de amplitudine mare, suprapuse peste un efort static de valoare coborîtă și rupere la vibrații, produse de eforturi dinamice de amplitudine scăzută, suprapuse unei solicitări statice ridicate [3.54]. Defecțiunile din prima grupă se produc prin rezonanță între frecvența proprie de vibrație a paletelor și frecvența de vibrație a surselor de excitație a acestora. Între acestea se numără neuniformitatea fluxului de abur, cauzată de pereții ajutajelor, de îmbinările diafragmelor, de dimensiunile inegale ale canalelor dintre paletele rotorice, precum și vibrația rotorului, provocată de deze-

chilibrarea sa. Răspunzătoare pentru aceste defecțiuni sînt proiectarea greșită și dispersia mare a frecvenței proprii a paletelor în timpul funcționării. Dispersia valorilor frecvenței proprii de vibrație este cauzată de inexactități de fabricație și de diferențe în eforturile produse prin fixarea piciorului paletei. Astfel de exemplu, prin slăbirea piciorului paletei în locașul de fixare, crește lungimea liberă a paletei, l, supusă vibrației. Ca urmare, scade frecvența proprie de vibrație a paletei ν conform relației $\nu = \frac{k}{l^2}$, în care k este o constantă. Prin modificarea frecvenței proprii, vibrația paletei poate să se apropie de domeniul de rezonanță și astfel să amplifice solicitarea dinamică. Slăbirea fixării paletei are ca urmare producerea de uzuri pe piciorul ei, care devin concentratoare de tensiuni.

În exploatare este necesar să se respecte limitele de variație a frecvenței, deoarece în afara acestora și uneori foarte aproape de acestea,



a

Fig. 3.39. Efectul extracției de abur asupra repartiției presiunilor în camera prizei [3.56] :
a — schema punctelor de măsură a presiunii ;

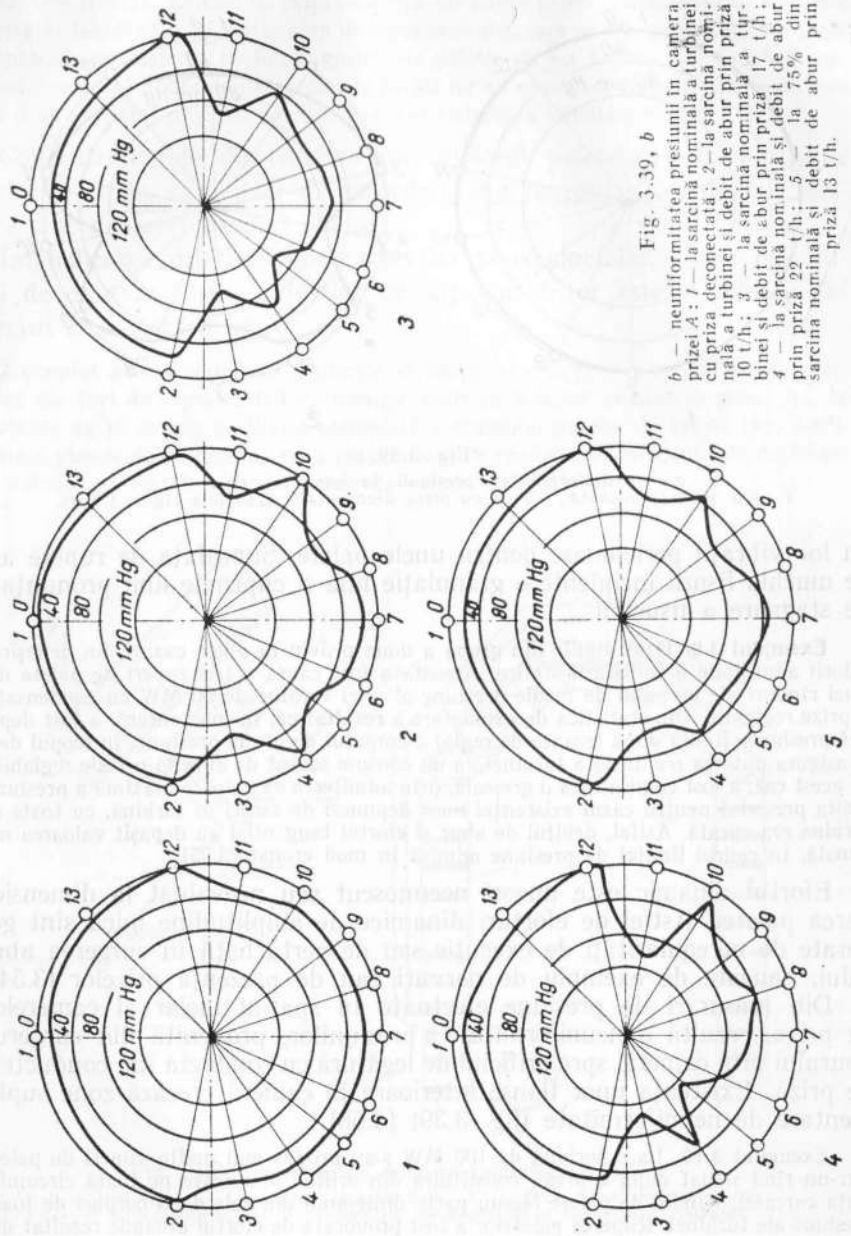


Fig. 3.39, *b*

b — neuniformitatea presiunii în camera prizei *A* : *1* — la sarcină nominală a turbinei cu priza deconectată ; *2* — la sarcină nominală a turbinei și debit de abur prin priză 10 t/h ; *3* — la sarcină nominală a turbinei și debit de abur prin priză 17 t/h ; *4* — la sarcină nominală și debit de abur prin priză 22 t/h ; *5* — la 75% din sarcina nominală și debit de abur prin priză 13 t/h.

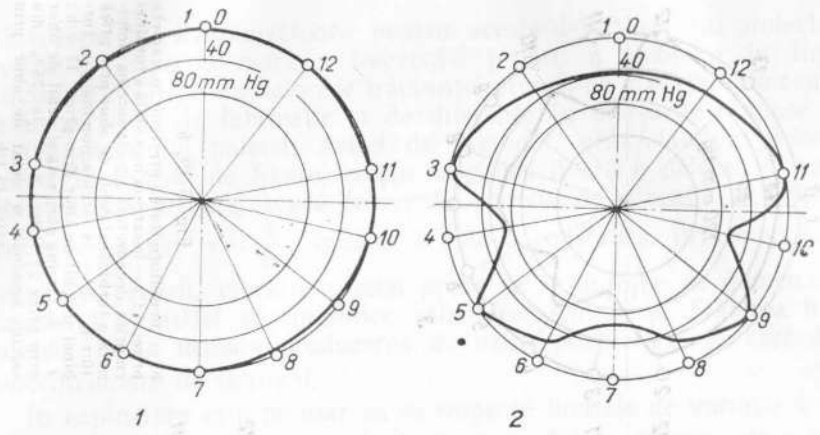


Fig. 3.39, *c*

c — neuniformitatea presiunii în camera prizei *B*: *1* — cu priza conectată; *2* — cu priza deconectată. (750 mm Hg = 1 bar).

au loc vibrații periculoase pentru unele palete. Suprafața de rupere are pe muchia fisurii incipiente o granulație fină și cuprinde linii pronunțate de stagnare a fisurării.

Exemplul 3.9. Defecțiunile din grupa a doua provin în unele cazuri din depășirea valorii admisibile a solicitării statice. Aceasta a fost cauza a trei ruperi de palete din cinci rînduri ale corpului de medie presiune al unei turbine de 50 MW cu condensație și prize reglabile. Din statistica de exploatare a rezultat că, în mod curent, a fost depășită presiunea limită după treapta de reglaj a corpului de medie presiune, în scopul de a se asigura puterea nominală a turbinei, la un consum scăzut de abur la prizele reglabile. În acest caz, a fost comisă încă o greșeală, prin admiterea ca valoare maximă a presiunii limita prescrisă pentru cazul existenței unor depuneri de săruri în turbină, cu toate că turbina era curată. Astfel, debitul de abur și efortul tangențial au depășit valoarea nominală, în cadrul limitei de presiune admisă în mod eronat [3.55].

Efortul dinamic este uneori necunoscut sau neevaluat la dimensionarea paletei. Astfel de eforturi dinamice de amplitudine mică sînt generate de neregularități de execuție sau de perturbații în curgerea aburului, cauzate de exemplu de nervuri sau de prezența prizelor [3.54].

Din măsurări de presiune efectuate în spațiul inelar al camerelor de priză, rezultă o neuniformitate a presiunilor, provenită din curgerea aburului prin cameră, spre orificiul de legătură cu conducta sau conductele de priză. Existența unor flanșe interioare în cameră creează zone suplimentare de neuniformitate (fig. 3.39) [3.56].

Exemplul 3.10. La o turbină de 100 MW s-au produs mai multe ruperi de palete într-un rînd situat după o priză, constituită din orificii practicate pe toată circumferința carcasei. Rîndul de palete făceau parte dintr-unul din cele două corpuri de joasă presiune ale turbinei. Ruperea paletelor a fost provocată de efortul dinamic rezultat din

perturbarea fluxului de abur de către prezența orificiilor prizei. Această explicație este întărită de faptul că în al doilea corp de joasă presiune, care nu este prevăzut cu o priză corespunzătoare înaintea rîndului simetric de palete, nu s-a produs nici o defecțiune. Ruperile au fost inițiate de fisuri, care la rîndul lor au constituit concentratoare de tensiuni și au accelerat procesul de obosire a materialului la solicitare ciclică.

Concentratoarele de tensiuni din piciorul paletelor, sub forma de muchii ascuțite, raze mici de racordare sau neregularități de la prelucrare sînt deosebit de periculoase.

Împiedicarea dilatării libere a țevilor și conductelor. Lipsa posibilității de dilatare liberă a țevilor de supraîncălzitor este o cauză a deformării și defectării lor.

Exemplul 3.11. Ecranul de protecție al părții superioare a peretelui unui focar, format din țevi de supraîncălzitor, pornește dintr-un colector montat ca punct fix, la o distanță de 12 m sub portiunea orizontală a drumului gazelor de ardere (fig. 3.40). Deoarece piesele de ghidare nu erau prevăzute cu o posibilitate suficientă de deplasare pe verticală, au fost smulse din perete ca urmare a dilatării.

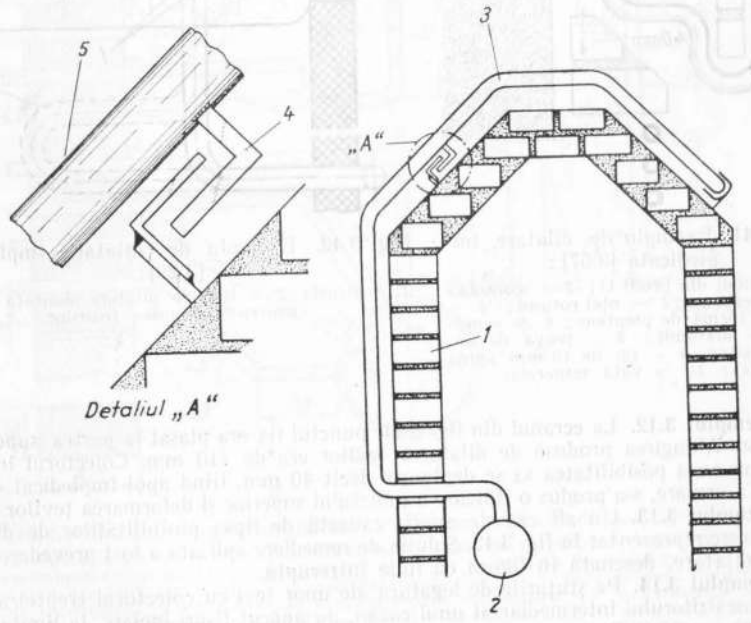


Fig. 3.40. Exemplu de dilatare împiedicată [3.57]:

1 — înzidire; *2* — colector (punct fix); *3* — țevi de supraîncălzitor; *4* — suport limitator; *5* — direcția de deplasare a suportului limitator.

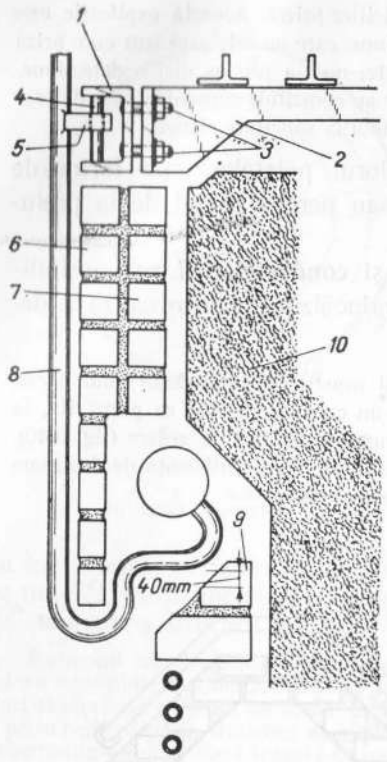


Fig. 3.41. Exemplu de dilatare împiedicată [3.57]:
1 — ghidaj din profil U; *2* — consolă; *3* — prezoane; *4* — oțel rotund; *5* — tablă în formă de pieptene; *6* — samotă; *7* — diatomit; *8* — țeavă de supraîncălzitor; *9* — joc de 40 mm (preamic); *10* — vată minerală.

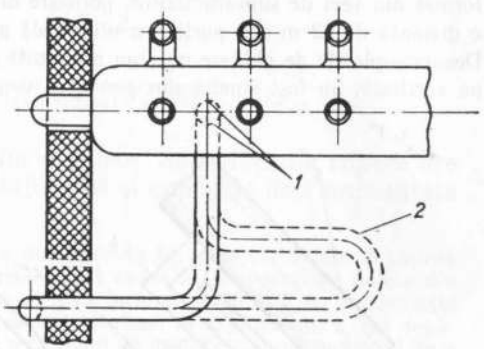


Fig 3.42. Exemplu de dilatare împiedicată [3.29]:
1 — fisuri; *2* — lîră de dilatare montată ulterior pentru prevenirea fisurilor.

Exemplul 3.12. La ecranul din fig. 3.41, punctul fix era plasat la partea superioară a țevilor. Alungirea produsă de dilatarea țevilor era de 110 mm. Colectorul inferior, mobil, nu avea posibilitatea să se deplaseze decît 40 mm, fiind apoi împiedicat de înzidire. Ca urmare, s-a produs o ridicare a punctului superior și deformarea țevilor [3.57].

Exemplul 3.13. Un alt caz de avarie cauzată de lipsa posibilităților de dilatare termică este reprezentat în fig. 3.42. Soluția de remediere aplicată a fost prevederea unei lire de dilatare, desenată în figură cu linie întreruptă.

Exemplul 3.14. Pe știuțurile de legătură ale unor țevi cu colectorul treptei a doua a supraîncălzitorului intermediar al unui cazan, au apărut fisuri inelare, la limita zonei de trecere a sudurii. Este un caz de avarie produs sub efectul combinat al presiunii interioare, al dilatării împiedicate și al solicitării ciclice. Dilatarea împiedicată era o consecință a lungimii diferite a țevilor solidarizate la un capăt de colectorul fix, iar la capătul celălalt de torcretul din deschiderea de trecere a țevilor prin peretele cazanului (fig. 3.43). Soluția de remediere a fost creșterea elasticității tronsoanelor de țeavă avariate, prin lungirea porțiunii pe care se localizează defectele [3.58].

Exemplul 3.15. Sistemele de susținere nu au permis suficientă libertate de dilatare pentru țevile convective. S-au produs eforturi mari de încovoiere, care au generat fisuri în sudurile serpentinelor la colectoare. Înțepenirea țevilor în suporți în timpul dilatării a fost cauzată de înclinarea suporților. Din analiza făcută, a rezultat ca necesar să se limiteze lățimea suportului în zona de sprijin a țevii și să se evite diferențele mari de temperatură, care pot apărea în timpul pornirii și opririi, între țevile de la capetele serpentinei [3.59].

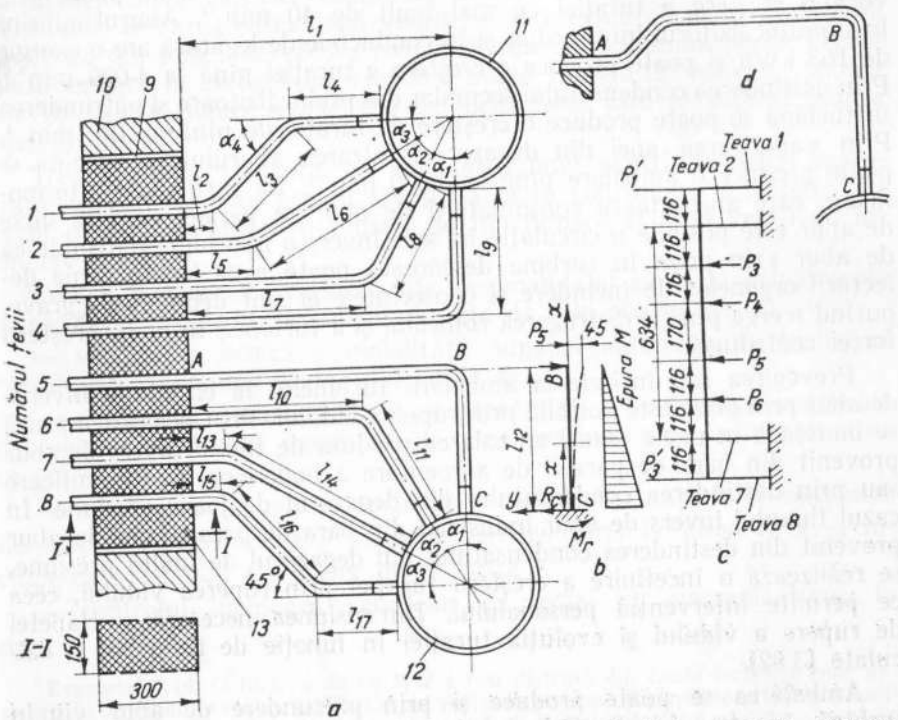


Fig. 3.43. Schema supraîncălzitorului intermediar, exemplu de dilatare împiedicată [3.58].
a — configurația țevilor în exteriorul drumului de gaze de ardere; *b* — schemă de calcul pentru determinarea tensiunilor în metalul țevii nr. 5; *c* — schemă de calcul pentru determinarea deformației peretelui torcretat; *d* — configurația țevilor nr. 5, care permite reducerea tensiunilor de încovoiere; *1–8* — țevi de supraîncălzitor intermediar; *9* — garnitură din carton asfaltat; *10* — înzidirea cazanului; *11* — colector de intrare; *12* — colector de ieșire; *13* — perete torcretat; $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = 30°$; $\alpha_4 = 45°$; $l_1 = 830$ mm, $l_2 = 90$ mm; $l_3 = 345$ mm; $l_4 = 290$ mm; $l_5 = 240$ mm; $l_6 = 490$ mm; $l_7 = 575$ mm; $l_8 = 325$ mm; $l_9 = 380$ mm; $l_{10} = 530$ mm; $l_{11} = 380$ mm; $l_{12} = 430$ mm; $l_{13} = 120$ mm; $l_{14} = 615$ mm; $l_{15} = 90$ mm; $l_{16} = 410$ mm; $l_{17} = 250$ mm.

Suprasolicitarea mecanică a turbinelor cu abur. La descărcarea bruscă și totală a generatorului, dispare practic cuplul rezistent, deoarece frecarea în lagăre și energia consumată pentru antrenarea organelor de reglaj și a pompei de ungere sînt neglijabile. Sub efectul energiei acumulate în aburul din sistemul compus de corpul turbinei și de conductele de legătură, care se destinde în turbină, grupul turbogenerator are tendința de ambalare. Corelația dintre această sursă de energie și creșterea turației, efectuată pentru un bloc de 125 MW [3.61], poate servi la crearea unei imagini generale privind fenomenul. Energia potențială conținută în aburul aflat în corpul turbinei de înaltă presiune și în conductele de legătură spre preîncălzitoare este redusă și nu poate provoca o creștere a turației cu mai mult de 40 min^{-1}. Aburul cuprins în supraîncălzitorul intermediar și în conductele de legătură are o energie de 163 kWh și poate provoca o creștere a turației pînă la 4 000 min^{-1}. Prin destinderea condensatului secundar din preîncălzitoare și pătrunderea în turbină se poate produce o creștere de turație de pînă la 190 min^{-1}. Prin vaporizarea apei din degazor și intrarea aburului în turbină se poate produce o ambalare pînă la 5 500 min^{-1}. La turbinele de termoficare, care alimentează consumatorii de abur în paralel cu alte surse de abur este posibilă o circulație în sens invers a aburului. Pătrunderea de abur prin prize în turbina descărcată poate avea loc în urma defectării organelor de închidere și consecințele ei sînt deosebit de grave, putînd merge pînă la distrugerea rotorului și a turbinei, în urma creșterii forței centrifuge.

Prevenirea sau întîrzierea ambalării turbinelor la circulație inversă de abur prin prize este posibilă prin ruperea vidului. Prin această măsură se limitează în unele cazuri ambalarea produsă de fluxul invers de abur provenit din bara de paralel de alimentare a boilerelor de termoficare sau prin destinderea condensatului din degazorul de joasă presiune. În cazul fluxului invers de abur industrial din bara de paralel sau de abur provenit din destinderea condensatului din degazorul de înaltă presiune, se realizează o încetinire a creșterii turației prin ruperea vidului, ceea ce permite intervenția personalului. Dimensiunea necesară a clapetei de rupere a vidului și evoluția turației în funcție de timp pot fi calculate [3.62].

Ambalarea se poate produce și prin pătrundere de abur viu în turbină, în urma funcționării defectuase a ventilelor de închidere rapidă și a ventilelor de reglaj. Neînchiderea lor poate fi provocată de înțepeniri prin depuneri de săruri, înțepenirea ciupercii ventilului în segmenții de etanșare, înțepenirea pistonului exterior în cilindrul de ghidaj, din cauza apăsării excentrice a resoartelor de închidere. Depunerile de săruri se formează dacă aburul nu îndeplinește condițiile de puritate prescrise. Înțepenirea ciupercii sau tijei ventilului sînt cauzate, în special la temperaturi ridicate (570°C), de calitatea necorespunzătoare a materialului. Astfel, s-a renunțat la construirea lor din oțeluri slab aliate, nitrurate. Tijele confecționate din oțelul înalt aliat X 20 CrMo 12 1 cromat nu au dat rezultate din cauza microfisurilor, care au apărut în straturile cromate de mare duritate. Se recomandă și se utilizează în prezent tije din oțel aliat, de exemplu X 20 CrMoV 12 1 sau 10 CrMo 9 10, nichelate și apoi acoperite cu un strat de stelit, aplicat printr-un procedeu cu plasmă. O măsură suplimentară constă din prevederea unei bucșe de ghidaj din stelit.

Înțepeniri de tije se produc și prin deformarea lor plastică, fie din cauza deformării carcasei ventilelor, fie prin poziția oblică a scaunului ventilului. Deformarea carcasei ventilelor se previne printr-o construcție simetrică din punct de vedere termic. Suprafața scaunului poate fi profilată concav în carcasă iar ciuperca poate fi șlefuită convex, pentru a evita sau a reduce momentele de încovoiere, care ar acționa asupra tijei [3.63].

Trebuie remarcat faptul că defectarea unui ventil de reglaj reprezintă un pericol mare pentru funcționarea în continuare a turbinei, în cazul descărcării bruște și refuzul de funcționare al unui ventil de închidere rapidă.

Pentru prevenirea avariilor, este recomandabil să se ia următoarele măsuri de exploatare, suplimentare față de cele obișnuite:

— verificarea zilnică a mobilității supapei automate de închidere rapidă, pe o porțiune scurtă din cursa sa;

— verificarea periodică (la 2—4 săptămîni) a mobilității ventilelor de reglaj pe întreaga cursă, de la plină sarcină, pînă la funcționarea în gol;

— verificarea la oprirea turbinei a închiderii complete a ventilelor de închidere rapidă, după scăderea sarcinei pînă la circa 10% și închiderea prealabilă a clapelor de pe prize;

— controlul închiderii ventilelor de reglaj cu sincronizatorul, la oprirea turbinei.

Exemplul 3.16. O turbină de 60 MW a fost distrusă din cauza formării unor depuneri în sistemul de reglaj. [3.64]. Corpul de joasă presiune și generatorul au fost complect distruse, iar corpul de înaltă presiune a fost parțial deteriorat. Axul s-a rupt în patru bucăți. Din calculele efectuate, a rezultat că turbina a atins o turație de 5 000 min^{-1} în 8—10 s. Primind dispoziția de declanșare a generatorului unei turbine descărcate, mecanicul a declanșat din greșeală geheratorul unei turbine vecine încărcată la plină sarcină. Dispozitivul de siguranță, compus din două percutoare, sub acțiunea cărora se închide admisia de ulei la ventilele de închidere rapidă, nu a funcționat. În cadrul cercetărilor, s-a descoperit o ovalizare interioară a cilindrului servomotorului cu ulei, produsă prin depuneri de magnetită, care au făcut o legătură strînsă cu metalul de bază. Depunerile au provenit din coroziunea metalului cu oxigen atmosferic, în prezența unei

soluții slab acide ($pH = 5{,}3-5{,}6$). Aciditatea a provenit din pătrunderea apei de răcire în ulei, iar coroziunea s-a produs în timpul opririlor. S-a găsit magnetită și în conductele de ulei și în alte organe ale sistemului de reglare.

Suprasarcini în focare. La spargerea țevilor care conțin apă cu parametrii apropiați de starea de saturație, se evacuează o cantitate mare de fluid, care se destinde într-un timp foarte scurt. Suprafața spărturii din țeavă poate avea în cazuri defavorabile mărimea secțiunii țevii, dacă fluxul prin spărtură este alimentat dintr-o singură direcție, sau dublul acesteia, dacă alimentarea se face din ambele părți. Datorită impulsului, spărtura din țeavă se amplifică și poate provoca avarierea țevilor învecinate. Dacă țeava spartă trece printr-un spațiu închis de înzidirea cazanului, de volum mic, presiunea exercitată de aburul produs prin destinderea apei din sistemul de vaporizare asupra pereților spațiului închis poate produce dărîmarea acestora și chiar distrugerea cazanului [3.65]. Pentru a evita acest tip de avarii, se proiectează sistemul fierbător din țevi de diametru mic, iar țevile de coborîre sînt așezate în

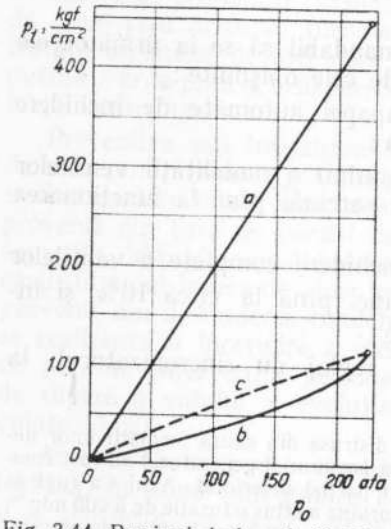


Fig. 3.44. Presiuni de impuls [3.65]:
a — apă în fierbere, cu întîrziere totală a fierberii; *b* — apă în fierbere, fără întîrziere a fierberii; *c* — abur saturat. (1 at = 1 kgf/cm² = 0,981 bar).

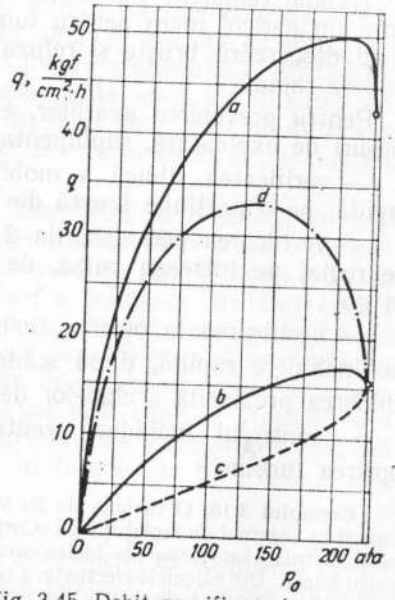


Fig. 3.45. Debit specific *q* de evacuare printr-o deschidere a unui rezervor sub presiune [3.65]:
a — apă în fierbere cu întîrziere totală a fierberii; *b* — apă în fierbere fără întîrziere a fierberii; *c* — abur saturat; *d* — valoare calculată pe baza unei formule experimentale. (1 at = 0,981 bar).

spațiu deschis. La cazanele moderne, cu ecranele construite din țevi cu aripioare sudate între ele, o țeavă separată este solidarizată cu țevile alăturate, ceea ce reduce intensitatea efectului spargerii.

Pentru calculul impulsului și al debitului evacuat printr-un orificiu, se pot utiliza diagramele din fig. 3.44 și 3.45. Starea efectivă a fluidului în timpul scurgerii prin spărtură nu poate fi exprimată exact în calcul, deoarece efectul frecării interne și al întîrzierii în vaporizarea lichidului la scăderea bruscă a presiunii nu se cunosc în măsură suficientă. Din acest motiv, sînt studiate pentru apă două cazuri extreme: cu întîrziere totală a fierberii și fără întîrziere. În fig. 3.44 este trasată o curbă intermediară, care descrie aproximativ situația reală [3.65].

La focarele în care se arde combustibil gazos, sînt posibile explozii în cazul acumulării de gaze. Aceasta poate să fie o consecință a defectării organelor de închidere sau a unei greșeli de exploatare. Pentru prevenirea lor, sînt utilizate diverse blocaje între organele de închidere.

Calitatea materialului. Există cazuri în care calitățile unor oțeluri nu au corespuns prevederilor.

Exemplul 3.17. [3.66]. La supraîncălzitoare construite dintr-un oțel austenitic aliat cu mangan și crom, s-a produs un număr mare de spargeri de țevi, după durate scurte de funcționare. S-a constatat că oțelul folosit era instabil în domeniul temperaturilor ridicate. El avea o componentă epsilon, care la temperaturi de 170—200°C trece în fază gama, cu modificări de volum și alunecări în rețeaua cristalină. În condițiile solicitării mecanice la temperatură înaltă, se precipită carburi la limitele și în interiorul granulelor de austenită.

Exemplul 3.18. [3.69]. Unele conducte de abur supraîncălzit intermediar sînt prevătute cu compensatoare ondulate articulate (fig. 3.46). Două sau trei compensatoare formează un sistem articulat, care compensează dilatarea în lungime a conductelor, prin mișcări unghiulare ale articulațiilor. Compensatoarele sînt construite din oțel austenitic sau feritic puternic aliat. Diametrele lor ajung pînă la 700 mm. Parametrii nominali de funcționare sînt pînă la 20 bar și 485 la 530°C. În exploatare, s-au produs defecțiuni la 44 compensatoare de acest tip, sub forma de fisuri pe circumferința ondulațiunilor. Din analiza avariilor, a rezultat că oțelul austenitic nu este potrivit pentru utili-

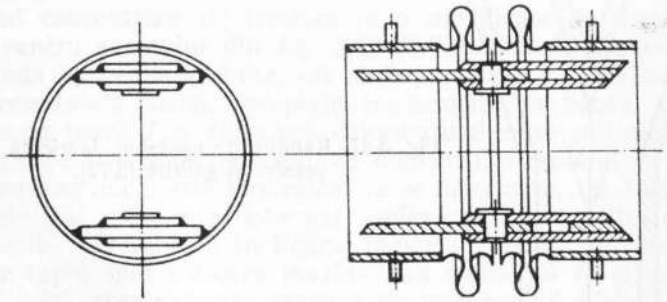


Fig. 3.46. Compensator ondulat articulat [3.69].

zare la construcția compensatoarelor ondulate, din cauza capacității sale reduse de deformare și a dificultăților de prelucrare. Nici utilizarea oțelului feritic pentru acest tip de construcție, la care solicitările locale maxime nu sînt bine cunoscute, nu este încă suficient clarificată. Măsura provizorie adoptată contra defecțiunilor a fost îngroșarea de la 3 la 4 mm a peretelui ondulațiunilor.

Exemplul 3.19. [3.37]. Oțelurile Cu—Ni utilizate la construcția tamburelor au proprietatea că, la prelucrarea la cald a tolelor, la temperaturi de ordinul 1 100°C, se produce o difuziune a cuprului din scorii în suprafața metalului, care creează zone favorabile producerii de fisuri. Dacă în aceste zone se produce o defecțiune a stratului protector de magnetită sau există un defect de fabricație, atunci, în timpul perioadelor de oprire, are loc o coroziune electrochimică, în prezența umidității și a oxigenului. Procesul este activat de segregațiile de cupru de pe limitele granulelor de metal.

Defecte de execuție. La fabricație, pot apărea diferite tipuri de neomogenități ale materialului ca: suprapuneri, stratificări, rizuri, incluziuni, fisuri etc. Suprapunerile se desfășoară paralel cu suprafața, în interiorul tablei sau a conductei. Ele sînt provocate de obicei de incluziuni în blocul brut, care sînt aplatizate prin laminare și cel mai adesea sînt puse în evidență la proba hidraulică [3.70].

Defectele de fabricație ale țevilor se manifestă după perioade de exploatare de 30—40 mii ore și impun opriri în avarie ale cazanelor. După rezultatele uneia din statisticile efectuate [3.75], s-a constatat următoarea repartiție procentuală a defecțiunilor de fabricație: suprapuneri 52%, rizuri superficiale, 1,6%, stratificări 11,4%, pete 4,9% rizuri profunde 17,9%, fisuri 6,5%, altele 5,7%. Se propune o perfecționare a metodelor de control înainte de montare în cazan, în special un control hidraulic de durată și intensitate mărită, efectuat în mod repetat.

Exemplul 3.20. [3.72]. În mai multe ramificații de tip pantalon, (fig. 3.47), confecționate prin forjare și găurire, s-au produs fisuri în muchia formată la intersecția celor două derivații din tronsonul principal. Din măsurări de microduritate, a rezultat o duritate extrem de mare în vîrful triunghiului, format de secțiunea perpendiculară pe muchie. Duritatea scădea la jumătate, de la vîrf spre bază, pe o lungime de numai 1,5 mm. Cauza o constituie particule de zgură de 0,10—0,15 mm, incluse în timpul fabricației în creasta peretelui despărțitor dintre derivații, precum și o reducere a ductilității materialului în această zonă, ca urmare a procesului de găurire ale celor două derivații ale pantalonului.

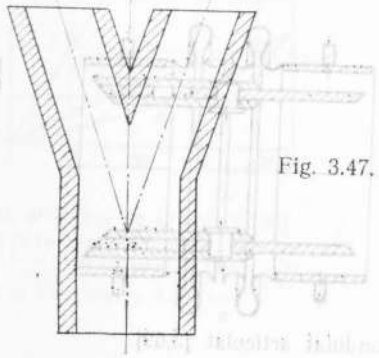


Fig. 3.47. Ramificație pantalon, fabricată prin presare și găurire [3.72].

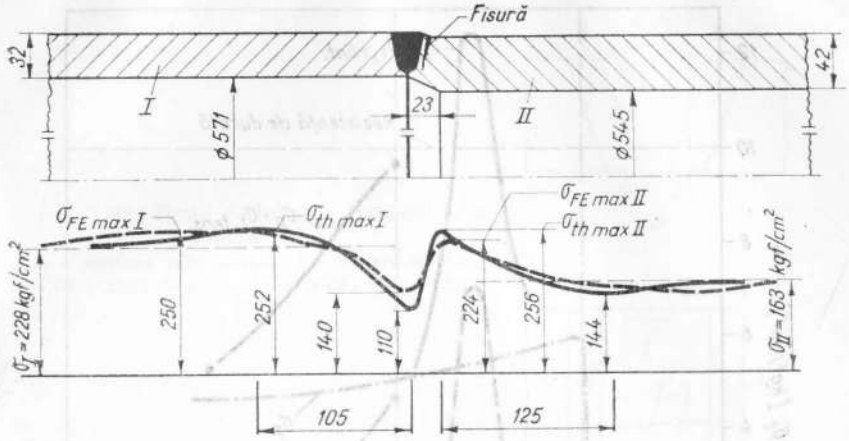


Fig. 3.48. Distribuția tensiunilor longitudinale într-o îmbinare, cu modificare de secțiune [3.73]:
(1 kgf/cm² = 9,81 N/cm²).
—— teoria membranelor σ_{th}; ---- teoria elementelor finite, σ_{FE}.

Execuția sudurilor, care lucrează la temperaturi și presiuni ridicate, constituie și ea cauza a numeroase defecțiuni, care apar în aceste zone. Cele mai solicitate elemente din sistemele de conducte sînt zonele care cuprind curbele și piesele fasonate. În jurul sudurilor din aceste zone, apar adesea fisuri transversale pe axa conductei. Apariția lor nu poate fi explicată numai prin eforturile mecanice de durată, care iau valori maxime pe generatoarea țevii. Eforturile care produc fisurile transversale în apropierea sudurilor provin din eforturile produse de presiunea internă, concentrarea de eforturi prin modificarea diametrului sau a grosimii peretelui celor două piese reunite prin sudură și componenta longitudinală a tensiunilor interne din sudură.

Efectul concentrării de tensiuni la o modificare de diametru este calculat pentru exemplul din fig. 3.48 [3.73]. Calculele efectuate, atît prin metoda elementelor finite, cît și după teoria suprafețelor subțiri, au dat rezultatele foarte apropiate consemnate în figură. Cele două tronsoane de țeavă *I* și *II* suferă deformații diferite sub efectul presiunii interioare. În zona reducerii de diametru, tronsonul *I*, cu perete de grosime mai mică, este împiedicat să se deformeze, iar tronsonul *II*, cu peretele mai gros, este deformat suplimentar. Repartiția eforturilor longitudinale, reprezentată în figură, indică un minim în zona sudurii, care trece rapid spre valoarea maximă din tronsonul *II* și cu o pantă ceva mai mică, spre valoarea maximă de tronsonul *I*. Valorile maxime se află mult sub limita de fluaj.

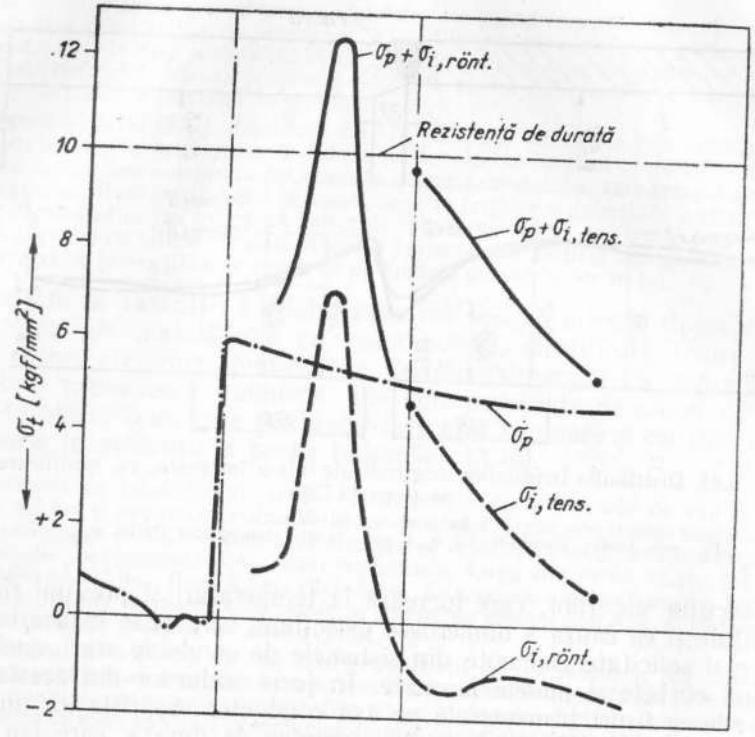


Fig. 3.49. Compunerea tensiunilor mecanice (presiune interioară) cu tensiunile interne măsurate [3.73]:
σ_p — tensiune mecanică (din presiune interioară); $\sigma_{i,\,tens}$ — tensiune internă determinată tensometric; $\sigma_{i,\,rönt}$ — tensiune internă determinată röntgenografic; σ_t — tensiune totală. (1 kgf/mm² = 9,81 N/mm²)

Limita de fluaj poate fi însă depășită, datorită tensiunilor interne produse de procesul de sudare. În fig. 3.49, se vede că, prin suprapunerea lor cu valorile maxime mecanice, este depășită rezistența la fluaj. Determinarea valorii tensiunilor interne s-a făcut pe cale experimentală, în condiții de laborator. S-au făcut determinări tensometrice și cu raze Röntgen. Este de presupus că, în condițiile execuției de șantier, apar tensiuni interne și mai pronunțate.

Gruparea fisurilor din zona sudurilor și stabilirea modului de producere este prezentat în continuare [3.74]. Fisurile de tipuri diferite, reprezentate schematic în fig. 3.50, se grupează în general în trei categorii.

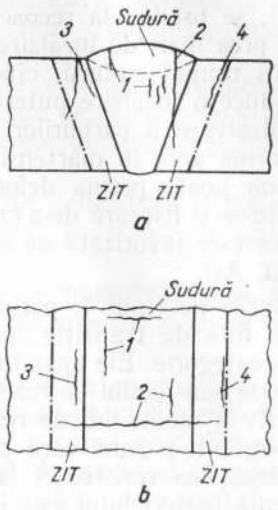


Fig. 3.50. Tipuri de fisuri în îmbinări prin sudură [3.74]:
a — secțiune prin sudură; *b* — vedere în plan; ZIT — zonă de influență termică; ⓝ — tipul fisurii.

În categoria întîia intră fisurile de tipul 1 și 2 din cordonul de sudură, care se produc atît la îmbinările conductă-conductă, cît și la îmbinările conductă-piesă fasonată din rețelele de conducte de abur supraîncălzit. Ele au de obicei o direcție transversală și mai rar o direcție longitudinală. Aceste fisuri se limitează în general la cordonul de sudură, dar există cazuri în care se extind și la materialul de bază. Analizele metalografice au arătat întotdeauna un caracter intercristalin al acestor fisuri. Fisurile din cordonul de sudură se produc la solidificarea, respectiv răcirea sudurii, la recoacerea de detensionare sau la oboseală, după o perioadă mai lungă de exploatare. Cele mai frecvente sînt fisurile generate de eforturile interne de contracție, apărute în timpul solidificării și răcirii sudurii.

Fisurile de tipul 3, paralele cu cordoanele de sudură, în porțiunea cu granulație grosieră a zonei influențate termic, constituie a doua categorie. Acest tip de defecte a putut fi constatat la îmbinările dintre conducte și piese fasonate, adică între elemente cu pereți de grosime diferită sau cu module de rezistență diferite. Ele apar pe partea elementului cu perete de grosime sau cu modul de rezistență mai mare. Originea fisurii se găsește pe partea exterioară a piesei, imediat lîngă sudură. Caracterul fisurii este intercristalin. Ele se produc de multe ori chiar înainte de începutul exploatării instalației. Fisurile din porțiunea cu granulație grosieră a zonei de influență termică, în imediata apropiere a

sudurii, se produc la recoacerea de detensionare. Ele sînt generate de viteze prea mari de încălzire şi răcire, precum şi de schimbări de structură în timpul sudurii, cînd, într-o zonă foarte apropiată de cordon, se produce o încălzire puternică, avînd ca efect o creştere a granulaţiei şi o dizolvare a carburilor elementelor de aliere în austenită, care se transformă apoi în martensită şi structură intermediară. Structura grosieră nu poate prelua deformaţiile necesare pentru detensionare, producîndu-se o fisurare de-a lungul fostelor granule de austenită. Formarea fisurilor este favorizată de separarea carburilor şi a impurităţilor (S, P, Sb, Cu, As).

Fisurile de tipul 4, paralele cu cordonul de sudură în zona de granulaţie fină de tranziţie spre materialul de bază neafectat, constituie a treia categorie. Ele apar în îmbinări prin sudură între piese cu grosime de perete sau modul de rezistenţă diferită, pe partea grosimii de perete, respectiv a modulului de rezistenţă mai mare. Fisurile se produc intercristalin, într-o zonă care prezintă dislocări structurale. Ele se produc prin depăşirea rezistenţei la oboseală a materialului. În unele cazuri, rezistenţa materialului este diminuată, ca urmare a coagulării carburilor elementelor de aliere în timpul sudurii, a tratamentului termic şi apoi în exploatare. Probe efectuate asupra unor epruvete cu structură asemănătoare cu cea a zonei examinate au indicat valori de rezistenţă de durată grupate mai mult spre zona inferioară şi chiar sub limita inferioară a benzii de variaţie a valorilor corespunzătoare materialului de bază [3.75]. Din analiza defecţiunilor, se constată în general că anumite zone din cusăturile prin sudură au o rezistenţă la fluaj mai mică decît valorile corespunzătoare atît materialului de bază, cît şi materialului de adaus [3.76]. Căldura introdusă prin procesul de sudură în zona de trecere critică este suficientă doar pentru o transformare parţială a structurii cristaline, dar nu şi pentru dizolvarea carburilor speciale. Porţiunea principală a zonei de trecere este supusă astfel unui efect de revenire, care favorizează descompunerea constituienţilor structurii metalului. La limita dintre zona de granulaţie fină şi materialul de bază, începe o coagulare a carburilor speciale, care este accentuată de tratamentul termic şi de condiţiile de exploatare. Aceste caracteristici structurale sînt specifice pentru rezistenţă scăzută la fluaj [3.77]. Cordoanele de sudură de la numeroasele oţeluri utilizate în construcţia recipienţilor sub presiune au o capacitate redusă de deformare la fluaj, mai ales în direcţia cusăturii. Dacă cordoanele se găsesc în zone concentratoare de tensiuni, de exemplu la derivaţii din cilindri cu pereţi groşi, ele sînt supuse unor deformaţii mărite, prin efectul de sprijin al materialului de bază din zonele cu solicitare neamplificată. Din acest motiv, pot să apară fisuri perpendiculare pe direcţia sudurii, sub efectul eforturilor tangenţiale generate de presiunea interioară. Această constatare impune controlul special al sudurilor de tipul menţionat, înaite de termenele prescrise pentru materialul de bază [3.78].

Domeniul rezistenţei la fluaj al sudurilor este încă insuficient cercetat, mai ales în ceea ce priveşte posibilităţile de ameliorare a comportării lor, prin desfăşurarea optimă a proceselor de sudură şi tratament termic.

Rezistenţa de durată a materialului poate fi depăşită şi din motive de concepţie. Astfel, se produc adesea fisuri în zonele de acumulare de material.

Pentru prevenirea apariţiei de defecte la îmbinările prin sudură, se conturează unele măsuri, care se deduc din analiza modului de producere al fisurilor.

Sudura şi tratamentul termic trebuie efectuate cu multă grijă, mai ales la oţelurile care conţin ca elemente de aliere molibdenul şi vanadiul, astfel ca tensiunile de solidificare să fie cît mai mici. Este necesar să se evite forme geometrice cu aglomerări de material în apropierea zonei sudurii. Materialul de bază trebuie să fie liber de impurităţi ca Sn, Cu etc., pentru a se evita segregări. Pentru evitarea fisurilor de oboseală în zona de trecere de la materialul de bază la zona influenţată termic, tensiunile axiale suplimentare trebuie menţinute la o valoare cît mai coborîtă. În acest scop, se realizează modificări de secţiune, respectiv de grosime a peretelui conductei, cît mai mici în domeniul îmbinării prin sudură.

Exemplul 3.21. O defecţiune cauzată de desfăşurarea necorespunzătoare a procesului de sudură şi de tratament termic s-a produs la un robinet cu sertar, la care s-au constatat fisuri de îmbinare prin sudură între corpul forjat şi corpul robinetului [3.72]. Defecţiunea s-a manifestat sub forma iniţială a unor fisuri transversale, care s-au dezvoltat sub forma de fisuri pe circumferinţă, în zona de tranziţie a îmbinării în materialul de bază. Flancurile fisurii cuprindeau oxizi. În material s-a constatat o scădere însemnată a concentraţiei de fier. În zona microfisurilor învecinate, s-a constatat de asemenea o scădere a concentraţiei de fier şi crom. Cauza apariţiei fisurilor a fost incluziunea de particule de oxizi în cusătură şi în tratamentul termic necorespunzător. Această ultimă concluzie se bazează pe duritatea mult diferită a corpului, capului şi îmbinării robinetului.

Exemplul 3.22. Din analiza modului de producere a fisurilor la sudurile unui număr de teuri ale conductelor de abur, confecţionate din oţel aliat, s-a constatat influenţa pe care geometria cordonului de sudură o are asupra frecvenţei fisurilor (fig. 3,51). Frecvenţa apariţiei fisurilor poate fi redusă prin mărirea razelor de racordare şi deplasarea zonelor de influenţă termică dincolo de zonele de solicitare maximă prin încovoiere.

Defectele de fabricaţie în piesele grele ale echipamentelor şi în special în rotoarele turbinelor pot avea efecte deosebit de grave. Astfel, s-a produs ruperea unui rotor de joasă presiune, ca urmare a existenţei unor fisuri în material. Ele s-au produs printr-o răcire prea rapidă

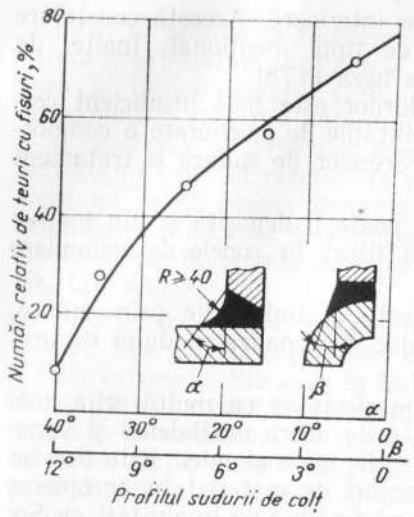


Fig. 3.51. Influența profilului sudurii de colț asupra deteriorării îmbinărilor prin sudură ale teurilor din conductele principale de abur [3.80]:

Numărul serpentinelor examinate	Profilul sudurii de colț	
	α	β
25	0 — 10	0 — 3
43	10 — 20	3 — 6
24	20 — 30	6 — 9
9	30 — 40	9 — 12
49	40	12

după recoacere. La fabricație, s-a căutat obținerea unor valori de rezistență cît mai ridicată a materialului. Este de preferat să se realizeze o tenacitate mai bună, care să permită reducerea tensiunilor prin deformație plastică, fără fragilizare [3.80].

3.1.6. **Depășirea jocurilor admisibile**

Procese tranzitorii. Al doilea efect al modificării temperaturii în cursul proceselor tranzitorii, și anume modificarea jocurilor între elementele fixe și cele mobile, provine din capacitatea termică diferită a organelor mașinilor termice și în special între rotor și carcasă. Din acest motiv, se produc dilatări diferențiale între rotor și carcasă, care pot depăși valorile admisibile, determinate de jocurile de montaj în direcția axială și în direcția radială. Zonele cele mai expuse la atingeri în direcția axială sînt labirinții de etanșare, paletele treptei de reglare și ale primelor trepte (deoarece aici se produc cele mai mari variații de temperatură în timpul proceselor tranzitorii). În direcția radială, zonele cele mai expuse la atingeri sînt labirinții de etanșare ai diafragmelor și labirinții terminali.

Atingerile axiale se produc în cursul proceselor de încălzire și răcire, prin creșterea inadmisibilă a dilatării relative între stator și rotor. Cauzele dilatărilor relative sînt masa mai mică a rotorului și schimbul mai intens de căldură între abur și rotor. Dilatarea relativă pozitivă

apare la încălzirea turbinei, ca urmare a introducerii aburului în turbină la pornire și a creșterii parametrilor aburului la mărirea sarcinei. Dilatarea relativă negativă apare la scăderea sarcinei, ca urmare a coborîrii parametrilor aburului. Ea apare și la repornire din stare caldă, deoarece prin destinderea accentuată a aburului în prima treaptă, temperatura sa scade sub cea a metalului [3.81]. Atingerile radiale sînt produse de deformarea carcasei din cauza diferențelor de temperatură, care apar între partea ei superioară și inferioară, combinate uneori cu deformarea rotorului.

Atingerile axiale se pot produce în special la repornirea din stare caldă și la opriri. Dilatarea relativă este negativă și atingerea se produce pe partea de intrare a aburului în paletele rotorului. La pornirea în stare rece, jocurile axiale cresc și deci nu apar riscuri. La pornirea bloc din stare caldă, temperatura aburului trebuie să fie mai mare ca temperatura metalului. În ipoteza repornirii cu abur mai rece, se produce o scădere a interstițiilor axiale, deoarece rotorul se răcește mai repede decît statorul. Avînd în vedere și faptul că încă de la oprire, rotorul s-a contractat mai mult decît statorul, există pericolul de atingere.

Un ritm de încărcare sau descărcare prea rapid poate de asemenea să fie cauza unor atingeri în direcție axială, prin creșterea dilatării relative. Este de subliniat faptul că, la declanșarea turbinei cu închiderea ventilelor de închidere rapidă, nu se produc deplasări relative, deoarece răcirea turbinei se face numai prin conductivitate către exterior și din față spre spate. Poziția rotorului față de stator nu se modifică. La funcționarea în gol însă, dacă aceasta are loc după o declanșare, se produce o răcire forțată de către aburul de antrenare.

Scăderea de temperatură a aburului viu și mai ales antrenarea de apă poate de asemenea să modifice nivelul de temperatură în turbină. De asemenea dacă, după oprirea intrării de abur în turbină, se trimite abur rece la labirintul din față, crește riscul de atingere la primele palete, ca urmare a contracției arborelui pe lungimea labirintului.

Există riscuri de atingeri axiale și în cazul încălzirii prea intense sau efectuate prea devreme a flanșelor turbinei. Această încălzire servește în mod normal la evitarea solicitărilor excesive ale carcasei și la prevenirea atingerilor axiale în labirinți și pe muchiile de ieșire ale paletelor rotorice ale turbinei, în cazul unei încălziri rapide. Dacă însă încălzirea flanșelor este prea intensă sau efectuată prea devreme, ea poate provoca o dilatare relativă negativă în treptele corespunzătoare părții încălzite a flanșelor. Astfel, la repornirea din stare caldă, cînd rotorul este contractat față de carcasă, dilatarea relativă negativă poate provoca atingeri în zona primelor trepte [3.82].

Atingeri radiale se pot produce și prin deformarea carcasei, provocate de diferența de temperatură între partea superioară și inferioară, precum

și prin deformarea rotorului. Diferența de temperatură în carcasă poate să apară la funcționarea prelungită în gol, din cauza admisiei parțiale a aburului sau după o pericadă de oprire, pe durata căreia partea inferioară este supusă unei răciri mai intense.

La depășirea unei valori maxime a diferenței de temperatură pe lățimea flanșei orizontale, aceasta se încovoaie în plan orizontal și presează asupra carcasei. Carcasa se deformează, astfel că secțiunea ei ia forma unei elipse în zona treptei de reglaj, cu axul mare vertical, iar în zona labirinților terminali, secțiunea ei ia forma unei elipse cu axul mare în planul orizontal.

Uneori este posibil ca temperatura generatoarei inferioare a carcasei să fie mai ridicată decît temperatura generatoarei superioare.

Un caz special de deformare trecătoare a carcasei se produce la turbinele cu supraîncărcare prin încălzirea unei porțiuni din zona treptei de reglaj la deschiderea ventilului de supraîncărcare.

Pentru evitarea unei reduceri inadmisibile a interstițiilor, se pot lua o serie de măsuri. La montaj și la reparații trebuie să se asigure un joc mai mic decît 0,4 mm între fețele de etanșare ale flanșelor.

Deplasarea în sus a carcasei în raport cu rotorul se poate produce și din cauza diferenței de temperatură între suporții carcasei și rotorului.

Pentru a evita o diferență de temperatură între suporții carcasei și ai rotorului, se asigură o răcire a penelor pe care se reazămă labele carcasei și se instalează un ecran protector al suportului lagărului din față contra radiației de căldură de la carcasă. Încălzirea părții inferioare a carcasei și buna ei izolare termică dau rezultate bune.

Deformația rotorului favorizează producerea atingerilor radiale. Ea poate fi o urmare și a diferențelor de structură internă a metalului. Diferențele de structură au ca efect diferențe de dilatare și ca urmare se produce încovoierea rotorului. Pentru verificarea rotorului din acest punct de vedere, se efectuează în cadrul procesului de fabricație o probă de rotire la cald, la o temperatură cît mai ridicată. Dacă totuși fenomenul de deformare se produce în exploatare, este necesar un tratament termic al rotorului.

Declanșarea virorului este o cauză frecventă a avariilor de încovoiere a arborelui. Încercările au arătat că o întrerupere a funcționării virorului de numai 1—2 minute, în faza de admitere a aburului la labirinții exteriori, are ca efect o încovoiere inadmisibilă a arborelui. Din acest motiv, este indicat ca turbinele să fie echipate cu semnalizatoare acustice ale opririi virorului și cu ampermetre înregistratoare ale curentului absorbit de motorul virorului.

Coborîrea rapidă a turației și menținerea ei la un nivel scăzut de 300—400 min^{-1}, pînă la dispariția curburii, previne avarierea prin încovoierea axului. Dacă însă s-au produs atingeri în labirinți, încovoierea crește, prin încălzirea locală și turbina trebuie imediat oprită [3.83].

Pentru a stabili dacă o atingere a fost cauzată de deformația carcasei sau a rotorului, se poate ține seama de faptul că, în cazul încovoierii carcasei, se produc frecări pe o zonă a carcasei și pe întreaga circumferință a rotorului, iar la încovoierea rotorului, carcasa este frecată pe întreaga circumferință iar rotorul numai pe o zonă limitată.

O categorie particulară de avarii, declanșate prin atingerea chiar slabă între rotor și stator, este cauzată de magnetismul remanent al rotorului turbinei. După prelucrări mecanice, arborii turbinelor rămîn cu un magnetism remanent, care generează tensiuni electrice continui. Circuitul se poate închide prin carcasă, prin lagărele pompei principale de ulei, la o eventuală atingere între stator și rotor în timpul funcționării. Curentul la început mic amplifică cîmpul magnetic și crește astfel pînă la valori de cîteva mii de amperi. Curentul distruge lagărele pompei de ulei, al cărei arbore poate să se rupă. Pentru evitarea acestor avarii, destul de rare, trebuie amplificate jocurile în zonele în care se constată atingeri [3.84].

Pătrunderea de apă în turbină și circulația inversă prin prize. Deformarea carcasei și a rotorului se pot produce și în cazul pătrunderii de apă sau de abur în sens invers în turbină. Avariile produse în acest fel se caracterizează prin gravitatea lor; ele sînt destul de frecvente [3.85].

În condiții normale de exploatare, prin prize curge abur a cărui temperatură variază lent, iar în treptele după supraîncălzirea intermediară rămîne practic constantă, la variația sarcinei pe turbină. În situații anormale, de exemplu la scăderea bruscă a sarcinei la zero sau la spargerea de țevi în preîncălzitoare, este posibilă inversarea sensului de circulație prin prize, însoțită de pătrunderea de apă în turbină. Pătrunderea de apă din preîncălzitoare este posibilă la nivel ridicat, iar acesta poate fi cauzat de spargerea unei țevi, de funcționarea incorectă a regulatorului de nivel sau de rezistența prea mare a conductei de evacuare a condensatului secundar.

Fenomenul de circulație inversă poate fi analizat pe exemplul prizelor de înaltă presiune. Condensatul secundar al preîncălzitoarelor alimentate din aceste prize se scurge în cascadă. În cazul declanșării turbinei, presiunea scade brusc în întreg corpul ei, pînă la o valoare puțin deasupra presiunii din condensator. Datorită diferenței de presiune create între degazor și turbină, se inițiază o circulație în sens invers, dacă organele de reținere nu funcționează corect și nu închid prizele. Temperatura aburului care pătrunde în turbină scade foarte rapid la valoarea corespunzătoare saturației la noua presiune, mult mai scăzută decît temperatura carcasei și a rotorului în zonele de priză. Aburul

fiind în stare de saturație, coeficientul de transfer termic este foarte ridicat, astfel că se produce o răcire locală intensă a carcasei și a rotorului. În turbină aburul are o mișcare ascensională, în cursul căreia, preluînd căldură, devine supraîncălzit, iar coeficientul de transfer termic scade mult. Din acest motiv răcirea părții superioare a turbinei este mai redusă și se produce o diferență de temperatură între partea superioară și cea inferioară a carcasei, care duce la deformarea carcasei. Circulația inversă se poate produce și în prizele de joasă presiune. Aici efectele sînt mai reduse ca intensitate, deoarece și temperaturile de regim sînt mai coborîte. Dacă rotorul este oprit, el suferă un fenomen similar ca în cazul circulației inverse examinate.

Exemplul 3.23. Din descrierea avariei produse la o turbină de 50 MW, 132 bar, 565°C, cu două prize reglabile, rezultă detalii semnificative asupra modului de producere și a efectelor circulației inverse. După oprirea programată a grupului, în timpul învîrtirii cu virorul, s-a ars motorul acestuia, la 20 de minute de la oprirea turbinei. La deschiderea turbinei, s-au găsit în zona celor două prize de înaltă presiune (39 bar și 20 bar) următoarele urme de frecare: frecare puternică la partea inferioară a carcasei, atingeri ușoare la vîrfurile paletelor statorice în planul orizontal, frecări puternice la vîrfurile paletelor rotorice și pe arbore. Carcasa a căpătat o săgeată de circa 2,5 mm iar rotorul care nu a mai fost rotit circa 30 min o săgeată de circa 1 mm. Cauza deformării carcasei și ulterior a rotorului oprit a fost o pătrundere în turbină de abur și apă la temperatura de circa 90°C, corespunzătoare presiunii $p_a = -0{,}3$ bar, după oprire. Rotorul și carcasa aveau înainte de oprire circa 320°C și au fost supuse unei răciri intense la partea inferioară. Pătrunderea de apă s-a produs din conducta de paralel între degazoarele cu $p_a = 6$ bar, prin preîncălzitorul cu $p_a = 20$ bar. Dintre organele de închidere, o vană nu a fost închisă, a doua vană a fost și ea probabil deschisă parțial, iar clapa de reținere nu închidea complet.

Exemplul 3.24. O altă avarie s-a produs prin crearea unei diferențe de temperatură între jumătatea inferioară a carcasei, mai caldă și jumătatea superioară, mai rece. În turbina rece a pătruns abur prin clapa de reținere de pe priza de alimentare a degazorului. Diferența de temperatură s-a accentuat imediat după începerea rotirii și admisia de abur la labirinți, a căror descărcare se face în priza învecinată. În loc să se respecte diagrama normală de pornire, s-a menținut turbina un timp îndelungat pe un palier coborît de turație. În această situație se admite un debit redus de abur în turbină, care nu poate uniformiza temperaturile carcaselor. Avaria ar fi putut fi evitată, dacă ridicarea turației și sincronizarea s-ar fi făcut în timpul normat, asigurînd un debit de abur suficient pentru uniformizarea temperaturii.

Pentru prevenirea deformațiilor și atingerilor produse prin circulația inversă, se recomandă următoarele măsuri:

— întreținerea în stare bună și controlul periodic al armăturilor de închidere și în special al clapetelor de reținere de pe conductele de legătură între prize și sursele potențiale de abur de întoarcere;

— închiderea cu grijă, chiar și la opririle de scurtă durată, a tuturor vanelor de pe traseele de abur și condensat secundar;

— închiderea vanelor de pe prize, la opriri intempestive, chiar dacă se întrevede repornirea după scurt timp;

— urmărirea în timpul opririi a diferenței de temperatură între partea superioară și cea inferioară a carcasei și în zona prizelor de înaltă temperatură;

— oprirea virorului la creșterea anormală a curentului absorbit de motor;

— ritm de scădere a sarcinei la opriri programate suficient de lent, pentru a provoca o scădere accentuată a temperaturei metalului în zona prizelor [3.86].

Eficacitatea organelor de protecție contra pătrunderii de apă este gradată [3.87].

Neetanșeitățile sînt o cauză de atingeri și la pompele de alimentare. Ele se pot produce la pornirea pompei, ca urmare a deformării carcasei în timpul opririi. Carcasa se deformează sub efectul unei diferențe de temperatură, care apare în lungul ei, cînd prin neetanșeitatea vanelor de pe conducta de refulare sau de pe conducta de refulare intermediară, pătrund în pompă mici cantități de apă fierbinte, care o parcurg de la refulare spre aspirație. Defecțiunea se manifestă mai repede la pompele de alimentare supuse unui regim de funcționare cu multe porniri. Avînd în vedere faptul că asemenea neetanșeități sînt practic inevitabile, sînt posibile următoarele măsuri:

— efectuarea unei circulații a conținutului pompei, cu ajutorul unei pompe auxiliare;

— rotirea continuă, la turație redusă;

— introducerea continuă de apă de alimentare la temperatura de funcționare.

O măsură necesară din cauza neetanșeității armăturilor este aceea de a evita unificarea în apropierea pompei a conductelor de descărcare și de recirculare [3.127].

3.2. ACȚIUNEA MEDIILOR DE LUCRU

3.2.1. Coroziunea interioară

Coroziunea uniformă. Un metal pur se dizolvă în contact cu apa: în apă intră ioni încărcați pozitiv, iar pe metal rămîn sarcinile negative. În apropierea suprafeței metalului se aglomerează sarcinile pozitive și astfel ia naștere un condensator molecular, numit stratul dublu al lui Helmholtz. Prin formarea stratului dublu, se stabilește un echilibru și dizolvarea metalului încetează.

Ionii de metal se oxidează și formează pe suprafața metalului un strat protector. Diferite cauze, care produc deteriorarea stratului protector, reactivează procesul de oxidare, generînd astfel fenomenele de coroziune.

Modul de formare a stratului protector, precum și mecanismele de coroziune, depind de natura metalului și de cea a mediului cu care se află în contact.

Coroziunea uniformă a fierului în apă fierbinte și în abur. Reacția apă-fier este dependentă în principal de temperatură. În preîncălzitorul de joasă presiune, se formează hidroxid de Fe^{2+}, $Fe(OH)_2$, care este stabil pînă la circa 100°C. La creșterea temperaturei peste 100°C, $Fe(OH)_2$ se transformă în $Fe(OH)_3$ iar acesta trece în Fe_2O_3. În domeniul de temperatură peste 220°—240°C, ionii de Fe^{2+} sînt oxidați de oxigenul formației H_2O și ia naștere stratul de magnetită, Fe_3O_4 [3.88].

În țevile de supraîncălzitor, se produce o disociere termică a aburului. Moleculele de oxigen eliberate sînt chemisorbite de suprafața stratului de oxizi de pe suprafața metalului. Se formează magnetită și se eliberează hidrogen. În zona de contact a metalului pur cu stratul de magnetită, se produce o pătrundere a ionilor de oxigen din strat în rețeaua cristalină a metalului. Se formează magnetită, cu exces de fier și lipsă de oxigen. Stratul de magnetită cuprinde astfel două straturi, demarcate prin suprafața inițială a metalului. Stratul exterior are o concentrație ridicată de goluri de fier, iar cel interior o concentrație ridicată de goluri de oxigen. Diferențele de concentrație generează o difuziune a golurilor din rețeaua cristalină a celor două straturi [3.89].

Coroziunea uniformă a alamei în apă. În timpul exploatării, suprafața interioară a țevilor de condensator se acoperă cu un strat de oxid. Acesta este compus din două straturi, demarcate prin suprafața interioară inițială a țevii (fig. 3.52).

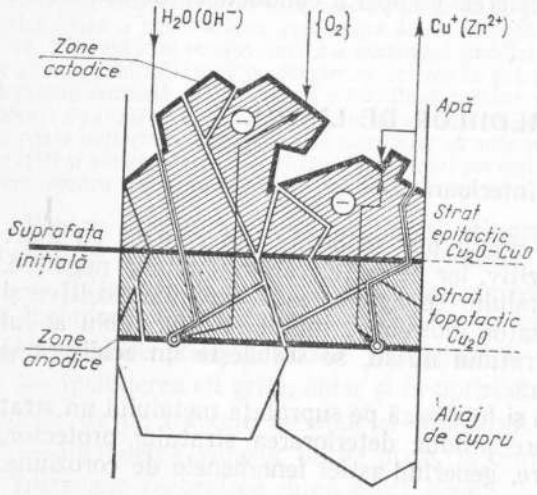


Fig. 3.52. Formarea în apă a stratului protector de pe un utilaj de cupru [3.90].

În apă se formează elemente electrochimice între suprafețele de separație Cu_2O — aliaj de bază (suprafața anodică) și Cu_2O — apă de răcire (suprafața catodică). Pe suprafața anodică se produce o oxidare a cuprului și o dizolvare a acestuia și a elementelor de aliere (Zn, Ni), cu transport de ioni H^+, Cu^+ și Zn^{2+} spre suprafața catodică. O parte din ioni sînt antrenați, iar o parte formează stratul exterior de oxid. Aceste reacții se desfășoară pe lîngă reacția catodică principală de reducere a oxigenului dizolvat în apă. Reacțiile simultane anodice și catodice se desfășoară prin straturile de oxid, impregnate cu electrolit, bune conducătoare de electroni. Densitatea de curent, respectiv viteza de oxidare, sînt determinate de diferența de potențial între catod și anod, de viteza de difuziune în apă a participanților la reacții și de rezistența internă ionică și electronică a elementelor de coroziune. Rezistența internă a elementelor de coroziune este puternic influențată de structura de defect a straturilor de oxid de cupru. Prin introducerea în goluri sau în locul ionilor de cupru a cationilor polivalenți de Zn, Si, Ni, se consumă electroni de defect și se ridică rezistența specifică electronică a stratului de oxid, reducîndu-se viteza de coroziune. Dimpotrivă, viteza de coroziune crește de 10 la 20 ori în apă cu conținut ridicat de cloruri. În acest caz, ionii de clor se substituie ionilor de oxigen în rețeaua de oxid. Dezechilibrul creat se compensează la fiecare substituție de ion de oxigen prin trecerea unui ion de cupru în soluție. În acest fel se favorizează difuziunea spre exterior a ionilor de cupru și coroziunea metalului. Din acest motiv apa cu conținut ridicat de cloruri este denumită agresivă. Se poate considera agresivă o apă cu o conductivitate provenită din cloruri mai mare de 1 000 μS/cm și conținînd suspensii predominant organice peste 10 mg/kg [3.90].

Coroziunea în profunzime. Sub acțiunea unor factori fizici și chimici, apar leziuni ale stratului protector al suprafeței metalice. Ca urmare, se produce o coroziune în profunzime, concentrată în aceste locuri.

Coroziunea în profunzime în apă în stare de fierbere. Un număr însemnat de spargeri ale țevilor vaporizatoare se produce ca efect al coroziunilor interioare. În unele cazuri, spargerile se produc în serii, concentrate pe intervale scurte de timp, după perioade relativ lungi de funcționare fără defecțiuni. Porțiunile de țeavă corodată prezintă cratere de formă circulară sau elipsoidală, cu diametre de cîțiva centimetri, umplute cu straturi de magnetită. Coroziunile se formează în locuri caracteristice și anume: în zone cu flux termic ridicat, în zone cu suduri, mai ales în prezența unor bavuri, în apropierea coturilor țevilor, mai ales în jurul arzătoarelor. Coroziunile se produc sub efectul unor factori de natură fizică și chimică.

Principalul factor fizic este temperatura peretelui țevii, care este determinată de presiunea în cazan, de fluxul termic, de viteza apei,

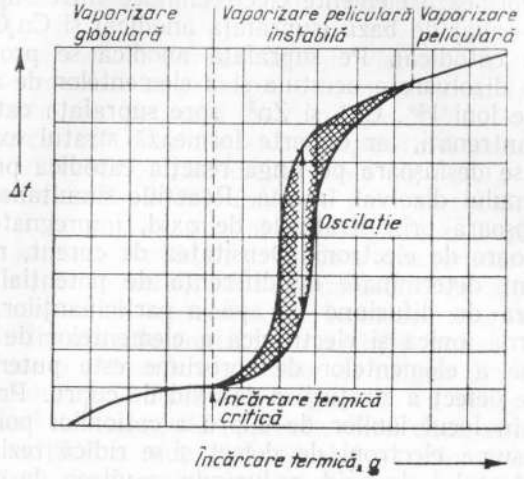


Fig. 3.53. Temperatura peretelui țevii fierbătoare în funcție de încărcarea termică [3.91].

de entalpia mediului și de înclinarea țevii. Temperatura peretelui crește foarte repede la trecerea de la vaporizarea globulară, la vaporizarea peliculară. În zona de tranziție dintre cele două forme de vaporizare, se pot produce oscilații de temperatură cu amplitudine mare (fig. 3.53). Eforturile suplimentare de origine termică, generate de vaporizarea peliculară și eforturile oscilante din zona de tranziție între cele două forme de vaporizare solicită în mod periculos stratul protector de magnetită. Acesta poate suporta alungiri specifice de 0,17—0,21% și scurtări specifice de 0,30—0,38% [3.92]. Deteriorarea stratului de magnetită inițiază coroziunea. Limita între vaporizarea globulară și vaporizarea peliculară este determinată de entalpia, presiunea și viteza fluidului. Există deci grupe coordonate de valori ale acestor mărimi, care sînt denumite condiții critice și care se determină experimental. În fig. 3.54 este prezentată corelația dintre condițiile critice [3.91]. Pentru evitarea fenomenului, este în general necesar să se mențină fluxul termic prin suprafețele de vaporizare sub valoarea critică căreia îi corespunde începutul zonei de tranziție de vaporizare instabilă.

Factorii chimici cei mai importanți sînt concentrația de săruri și substanțele solide în suspensie (oxizii de fier și de cupru). Pentru ca o leșie de sodă sau o soluție de cloruri să producă coroziune trebuie să se găsească în stratul de apă în contact cu peretele țevii într-o concentrație foarte ridicată. În această zonă se produce într-adevăr o concentrare a

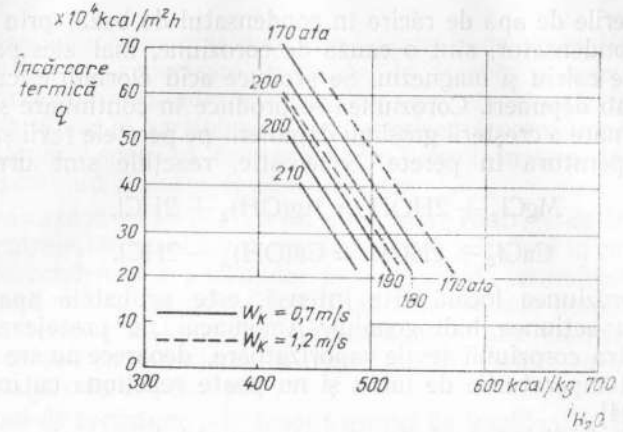


Fig. 3.54. Încărcarea termică critică în funcție de entalpia, presiunea și viteza apei [3.91]. (1 at = 0,981 bar ; 1 kcal = = 4,19 kJ ; 1 kcal/m²·h = 1,16 W/m²).

substanțelor nevolatile, dar valoarea ei este relativ scăzută, datorită fenomenului de difuziune în masa apei din țeavă. Dacă însă există cauze care împiedică difuziunea substanțelor din stratul limită de lîngă perete, concentrația lor poate ajunge la valoarea necesară pentru producerea coroziunii. Difuziunea este împiedicată de straturile poroase formate din depunerile de oxizi de fier și de cupru, vehiculate în cazan de apa de alimentare. Depunerile se formează cu precădere în zone de rezistență hidraulică sporită, în porțiunile de conducte care cuprind suduri cu bavuri și în coturile țevilor. Este de menționat faptul că prezența depunerilor înrăutățește schimbul local de căldură și prin mărirea gradientului de temperatură, mărește efortul în țeavă, ceea ce favorizează producerea coroziunii.

Coroziunea se produce în principal datorită concentrației de săruri, care ia naștere în condițiile descrise [3.91]. Astfel, hidroxidul de sodiu formează ferați ($Na_2O.FeO$) și feriți ($Na_2O.Fe_2O_3$), prin distrugerea stratului protector, ceea ce permite apei să reacționeze cu fierul, conform relației :

$$3Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2. \qquad (3.48)$$

Această reacție are loc la temperaturi mai mari ca 220—240°C și în condiții normale, creează stratul de magnetită. În condiții speciale, ca de exemplu la o viteză excesivă a fluidului, se produce un fenomen de eroziune-coroziune.

Pătrunderile de apă de răcire în condensatul de bază, prin neetanşeităţile din condensator, sînt o cauză de coroziune, mai ales pătrunderile de cloruri de calciu şi magneziu. Se produce acid clorhidric, care se concentrează sub depuneri. Coroziunea se produce în continuare şi se intensifică, ca urmare a creşterii grosimii depunerii pe peretele ţevii şi a diferenţei de temperatură în perete. Schematic, reacţiile sînt următoarele:

$$MgCl_2 + 2HOH \rightleftarrows Mg(OH)_2 + 2HCl, \quad (3.49)$$

$$CaCl_2 + 2HOH \rightleftarrows Ca(OH)_2 + 2HCl. \quad (3.50)$$

Dacă coroziunea locală este intensă, este probabilă apariţia unor defecte prin acţiunea hidrogenului. Amoniacul nu protejează în mod eficient contra coroziunii ţevile vaporizatoare, deoarece nu are moleculele ionizate la temperaturile de lucru şi nu poate reacţiona cu impurităţile din apă [3.94].

Oxigenul participă în măsură neînsemnată la coroziunea datorată impurităţilor din apă [3.91], fapt care este confirmat de prezenţa redusă a hidroxizilor trivalenţi de fier sau a hematitei în produsele de coroziune, prelevate din cazanele de înaltă presiune.

În craterele de coroziune din ţevile de vaporizare, se găsesc adesea cupru şi oxizi de cupru. Aceşti componenţi ai produselor de coroziune o favorizează, dar nu constituie cauze primare ale coroziunii.

Din analiza cauzelor coroziunii ţevilor vaporizatoare, rezultă că pentru evitarea ei este necesar să se limiteze sarcina termică specifică şi eforturile de natură termică şi să se reţină oxizii de fier din apa de alimentare şi în general să se asigure puritatea acesteia. Sarcina termică specifică se limitează prin măsuri constructive. Ţinînd seama de efectul entalpiei apei asupra fluxului critic, este recomandabil ca elementele suprafeţelor de vaporizare în care entalpia este încă mică să fie plasate în zonele de sarcină termică ridicată. Limitarea sarcinei termice specifice limitează eforturile termice, fiind însă necesară şi limitarea grosimii peretelui ţevilor. Oxizii de fier provin în mare parte din circuitul de apă de alimentare şi din preîncălzitoarele regenerative. Pentru reţinerea lor, se pot utiliza filtre de aluvionare cu bujii, pînă la temperaturi de 200°C. Pentru reducerea coroziunii în circuitul de alimentare, este necesară menţinerea unui pH ridicat. Valoarea acestuia a fost însă limitată în exploatare, pentru a se evita coroziunea cuprului. Din experimentări, s-a constatat însă că se poate ridica valoarea pH pînă la 9,3—9,4, în condiţii de coroziune minimă a cuprului [3.95].

Pătrunderea oxizilor de fier în cazan nu poate fi complet evitată, de aceea formarea depunerilor şi a craterelor de coroziune trebuie urmărită prin control nedistructiv. Testarea se poate face cu aparate cu ultrasunete.

Coroziunea ţevilor vaporizatoare este favorizată de concepţia constructivă a cazanelor cu vaporizare în trepte. În treapta a doua, respectiv a treia, se produce o concentrare a sărurilor care, combinată cu reducerea vitezei de circulaţie la sarcini parţiale, favorizează coroziunea, cu toate că sarcina termică specifică este mai redusă decît în treapta întîia, ca efect al aşezării judicioase a ţevilor în focar.

Asemenea cazane sînt instalate în numeroase centrale de termoficare. În aceste centrale, impurificarea condensatului principal în condensator, impurificarea condensatului secundar în boilerele de termoficare, impurităţile din condensatul industrial returnat sînt cauzele coroziunilor sistematice din treapta a doua de vaporizare. În multe cazuri, centralele echipate cu cazane cu vaporizare în trepte nu sînt dotate cu instalaţii de tratare a condensatului principal.

Fenomenul de coroziune este însoţit uneori de fragilizarea prin hidrogen a metalului. Acesta îşi pierde tenacitatea, fără ca rezistenţa la rupere să fie sensibil afectată. Hidrogenul se formează în zone cu sarcină termică ridicată, prin disocierea apei şi fixarea oxigenului în oxizi de fier („on-load corrosion"). Hidrogenul atomic difuzează în metal, pe care îl decarburează, formînd metan:

$$Fe_3C + 2H_2 \rightleftarrows CH_4 + 3Fe. \quad (3.52)$$

Metanul nu are posibilitatea să difuzeze din metal spre exterior. Din cauza presiunii pe care o exercită, se formează microfisuri la limita grăunţilor. Suprafaţa interioară a ţevii se caracterizează în acest caz printr-o decarburare puternică.

Exemplul 3.25. [3.96]. În cazanele cu circulaţie naturală ale unei centrale, s-au produs spargeri fragile de ţevi de ecran. Au fost constatate cratere de coroziune sub depuneri formate în ţevi. La analiza metalografică, s-a găsit în zonele defecte o structură feritică, cu segregare de carburi. S-a determinat în metal un conţinut de hidrogen de 11 — 25 cm³/100 g metal, faţă de un conţinut de 0,62 cm³/100 g metal pe partea ţevii opusă flacării. Depunerile erau formate din ferofosfaţi. Alcalinitatea p a apei de cazan era în apropiere de zero, iar pH = 6,9—8,0. La un alt grup de cazane cu vaporizare în trepte, s-au găsit sub depuneri mici fisuri cu orientare variabilă. Depunerile erau formate mai ales din oxizi de fier (49%), fosfaţi (24%) şi oxid de sodiu (8,5%). În apa de alimentare erau aduşi din circuit oxizi de fier. Concentraţia de fier în apa de alimentare era de 70—600 μg/kg iar în apa de cazan de 100—8 300 μg/kg. Pentru menţinerea alcalinităţii, s-a introdus în circuit o cantitate mare de amoniac, pînă la 2 000—4 500 μg/kg. Se recomandă realizarea unui indice pH = 9,5 în apa de cazan şi în acest scop introducerea de sodă caustică. Cantitatea de sodă caustică în exces în apa de purjă se recomandă să nu depăşească 20% din conţinutul total de săruri din aceasta. S-a renunţat la adausul de fosfat.

Un tip special de coroziune acidă este produs de pătrunderea de zahăr în apa de cazan. În fabricile de zahăr, aburul este utilizat în vaporizatoare, în care rezultă un condensat primar şi un condensat secundar

provenit din fierberea zemurilor. Zahărul pătrunde atît în condensatul primar, prin neetanşeităţile din vaporizator (produse adesea de coroziune), cît şi în condensatul secundar, datorită fenomenelor de antrenare. Ajuns în apa de cazan, zahărul dă produse acide, care corodează ţevile. La cazanele cu volum mare de apă, produsele acide pot fi neutralizate prin alcalinitatea apei. Acest remediu nu poate fi utilizat la cazanele acvatubulare, la care trebuie să se menţină o alcalinitate redusă.

Din acest motiv, legat şi de metodele imprecise de control de rutină al calităţii condensatului, nu se recomandă în acest caz recuperarea lui [3.97].

Coroziunea în profunzime (punctiformă) în abur umed. Coroziunea în adîncime se produce în paletele de turbină care lucrează în zona aburului umed. Punctele de coroziune se formează pe întreaga suprafaţă a paletei, dar mai ales în punctele în care se poate produce o oarecare concentraţie a impurităţilor (cloruri), generatoare de coroziune. Aceste puncte sînt cuprinse în zonele care nu sînt expuse fluxului continuu de abur şi unde sărurile nu sînt spălate de acesta. Astfel de zone sînt cele situate sub depuneri aderente, zonele cu viteză redusă a aburului sau zone turbionare, precum şi muchiile superioare ale pieselor intermediare.

Exemplul 3.26. Un caz de coroziune în profunzime, în care punctele de coroziune au construit amorsa pentru formarea de fisuri şi au provocat ruperea de palete, s-a produs la o turbină de 12,5 MW [3.98]. Coroziunile au fost produse în ultimele trepte de clorurile antrenate de abur, concentrate în interstiţiile dintre picioarele paletelor şi piesele intermediare.

Coroziunea în profunzime (punctiformă) în apă de răcire. Mecanismul formării stratului de oxid protector se poate deregla în anumite condiţii, generînd coroziuni locale. Coroziunea punctiformă este produsă de o densitate ridicată de curent în puncte privilegiate. Aceasta poate să apară la ţevile noi în cazul formării unor depuneri locale provenite din sărurile dizolvate în apă (de ex. de calcit), simultan cu formarea unor straturi microporoase de oxid. Depunerile acţionează ca nişte catode de suprafaţă mare cu discontinuităţi, în care suprafaţa neacoperită devine anod. Reacţiile anodice pe suprafaţa dintre materialul de bază şi stratul de oxid sînt împiedicate prin astuparea cu depuneri a porilor stratului de oxid. În micile suprafeţe libere, creşte intensitatea reacţiilor, corespunzător curentului catodic determinat de suprafaţa mare catodică (fig. 3.55).

Alte locuri expuse coroziunii punctiforme sînt incluziunile din materialul de bază. Prin canalele adiacente incluziunilor, este posibil un transport mărit de apă spre materialul de bază şi o evacuare intensificată a produselor coroziunii. Pentru a preveni coroziunea în profunzime a ţevilor noi, este necesar ca materialul să nu cuprindă incluziuni şi să se asigure în exploatare o curăţire continuă [3.90].

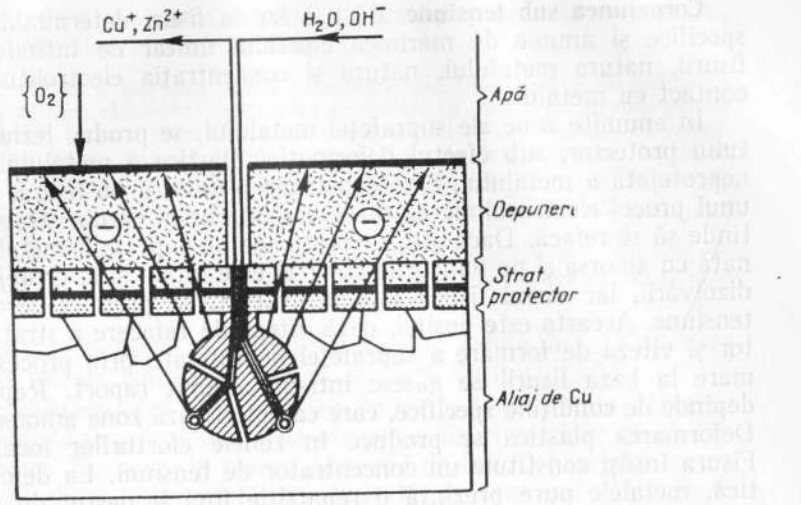


Fig. 3.55. Formarea coroziunii punctiforme într-un aliaj de cupru, sub depuneri [3.90].

Dezincarea alamei în apă de răcire [3.90]. Dezincarea alamei este un caz particular al coroziunii în profunzime, care se manifestă printr-o creştere a conţinutului de cupru în zonele atacate. Fenomenul se produce sub straturile de acoperire poroase, formate pe suprafaţa ţevilor, în apă cu conţinutul ridicat de cloruri. Creşterea conţinutului de cupru are loc în funcţie de potenţialele de coroziune. Astfel, se poate produce o dizolvare selectivă a elementelor de aliere, cu formarea hidroxidului de zinc, care se precipită şi este antrenat de condensat. Rămîne cupru spongios, prin care pătrunde apa de răcire [3.99]. Este de asemenea posibilă dizolvarea tuturor elementelor de aliere, urmată de depunerea cuprului pe suprafaţa atacată.

Exemplul 3.27 [3.103]. Comportarea în exploatare a ţevilor de condensator este examinată într-o lucrare elaborată pe baza analizei datelor obţinute de la 180 blocuri. Principalii factori de influenţă constataţi sînt calitatea apei şi compoziţia metalului. Se consideră satisfăcătoare calitatea unei ape, de răcire, cu un conţinut de săruri de 100—200 mg/kg, din care ioni de clor 0,8—9 mg/kg. Cu ape de acest tip, s-a constatat o comportare bună a ţevilor. Pentru ape de răcire cu o salinitate de 200—250 mg/kg, s-a constatat dezincarea şi defectarea în masă a ţevilor, după 6—8 ani de exploatare. Adîncimea critică de dezincare este de 0,3—0,4 mm. Alamele care conţin şi arsen se comportă mai prost. Se constată fisuri inelare în apropierea capetelor vălţuite ale ţevilor fabricate din acest material. Apariţia fisurilor a fost în multe cazuri generată de prezenţa tensiunilor interne. Se recomandă la montaj controlul prin sondaj al suprafeţei interne şi externe a ţevilor, la un număr reprezentînd 0,5% din loturi. La reparaţii, se propune prelevarea pentru control a 3—4 ţevi din zona inferioară a condensatoarelor.

Coroziunea sub tensiune dă naștere la fisuri determinate de condiții specifice și anume de mărimea efortului unitar de întindere, la baza fisurii, natura metalului, natura și concentrația electrolitului aflat în contact cu metalul.

În anumite zone ale suprafeței metalului, se produc leziuni ale stratului protector, sub efectul deformației plastice a metalului. Suprafața neprotejată a metalului, care constituie o amorsă de fisură, este supusă unui proces electrochimic de dizolvare, în cursul căruia stratul protector tinde să se refacă. Dacă stratul protector pe suprafața metalului învecinată cu amorsa și pe flancurile amorsei este intact și le protejează contra dizolvării, iar vîrful fisurii este neprotejat, se produce coroziunea sub tensiune. Aceasta este posibil, dacă viteza de refacere a stratului protector și viteza de formare a suprafeței neprotejate prin procese de deformare la baza fisurii se găsesc într-un anumit raport. Raportul critic depinde de condițiile specifice, care caracterisează zona amorsei de fisură. Deformarea plastică se produce în zonele eforturilor locale maxime. Fisura însăși constituie un concentrator de tensiuni. La deformare plastică, metalele pure prezintă o repartiție fină și destul de uniformă a liniilor de alunecare pe suprafața cristalelor iar aliajele prezintă trepte înalte de alunecare. Cu înălțimea treptelor de alunecare crește probabilitatea apariției unei leziuni a stratului protector. Zonele materialului de la baza fisurii activate continuu prin deformație plastică sînt atacate cu precădere de mediul coroziv, a cărui agresivitate variază după natura sa. Ionii de clor favorizează în mod deosebit coroziunea și pot forma amorsa de fisură prin coroziune punctiformă. Prezența lor accelerează coroziunea fisurantă sub tensiune [3.100].

Fisurile produse prin coroziune sub tensiune au în general un caracter intercristalin. Flancurile cristalelor sînt descoperite și pe suprafața lor se separă carburi, prin care se caracterizează fenomenele de dizolvare.

Coroziunea sub tensiune în apă-abur. Stratul de magnetită format în interiorul elementelor de cazan protejează metalul contra coroziunii. În cazul deteriorării stratului protector sub efectul unor solicitări inadmisibile, o porțiune din materialul de bază intră în contact cu apa și formează astfel un nou strat de magnetită. Secțiunea metalului de bază rezistent la eforturi este astfel micșorată. Compoziția metalului și regularitatea suprafeței sale influențează intensitatea procesului de coroziune sub tensiune. Stratul protector de magnetită se formează în condiții de funcționare a cazanului și este netensionat, iar în aceste condiții materialul de bază este supus întinderii și alungirii, sub efortul presiunii interioare. La oprirea cazanului, cînd dispare presiunea interioară ca și alungirea materialului de bază, se produce un efort de compresie asupra stratului de magnetită și o scurtare a acestuia. Stratul de magnetită este

solicitat la întindere la suprasarcină și în timpul proceselor tranzitorii, sub efectul solicitărilor termice [3.101].

Valoarea admisibilă a efortului unitar la compresiune fiind pentru magnetită de 600 N/mm², se consideră că aceasta este limita admisibilă în zona concentratoarelor de tensiune. Considerînd factorul concentrator de tensiune egal cu 3,5, rezultă ca admisibil în zonele nestabile ale materialului un efort unitar mediu de 170 N/mm². Admițînd un coeficient de siguranță de 1,5 și un coeficient de slăbire egal cu 0,75, rezultă valoarea necesară a limitei de curgere a materialului de bază $\sigma_{c,t} = \frac{17 \cdot 1{,}5}{0{,}75} = 340 \frac{N}{mm^2}$. Rezultă de asemenea pentru calitatea oțelului utilizat la construcția tamburelor că nu este necesar să aibă la temperatura de funcționare o limită de curgere mai mare de 340 N/mm² [3.102].

Coroziunea sub tensiune se poate produce și la palete de turbină, care au muchiile de intrare tratate, în scopul creșterii durității [3,54].

Coroziunea sub tensiune în apă de răcire. În țevile de alamă ale schimbătoarelor de căldură se pot constata de asemenea fisuri produse de coroziune sub tensiune. Ele apar în prima perioadă de funcționare sub forma de fisuri longitudinale intercristaline, cauzate de tensiunile interne de fabricație. Ele se pot elimina prin recoacere finală și prin efectuarea la recepție a probei cu amoniac.

După perioade mai îndelungate de funcționare, se produc fisuri transversale transcristaline la distanțe de 3—5 mm de la capătul vălțuirii, în zona de trecere a acesteia (fig. 3.56). Amorsa unei fisuri o constituie un punct de coroziune preexistent în zona vălțuirii. Tensiunea minimă necesară pentru producerea fisurii se obține prin însumarea efortului produs de presiune și a tensiunii interne, produse de procesul de vălțuire, amplificate în partea interioară a amorsei.

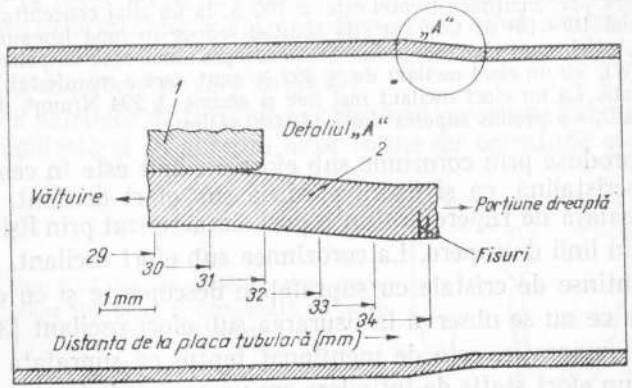


Fig. 3.56. Fisură în zona de trecere a vălțuirii [3.90]:
1 — placă tubulară; *2* — țeavă.

Fisurile transversale transcristaline se opresc în cele mai multe cazuri cam la jumătatea grosimii peretelui țevii, adică în zona fibrei neutre. Aici tensiunile de întindere trec în eforturi unitare de compresiune, astfel că efortul unitar echivalent scade ca valoare. Din motivul arătat extinderea fisurii în întreaga grosime a peretelui se produce mai rar. Pentru prevenirea fisurării prin coroziune sub tensiune, este necesar să se elimine amorsele de fisură, prin ameliorarea calității stratului protector al suprafeței interne a țevilor [3.90].

Coroziunea sub efort oscilant. Coroziunea fisurantă sub efort oscilant se produce sub efectul eforturilor variabile cu caracter periodic. Frecvența poate fi coborîtă („low-cycle corrosion fatigue"), cum este în cazul ciclurilor de pornire și oprire a cazanelor și a turbinelor sau ridicată, cum este în cazul paletelor de turbină.

În cursul solicitării oscilante, se deteriorează stratul protector al metalului, aflat în stare pasivă. Suprafața descoperită a metalului se pasivizează din nou și o parte din metal trece în soluție. Se formează astfel o amorsă de fisură, care constituie un concentrator de tensiuni. Stratul protector se rupe din nou la următoarea amplitudine maximă a efortului exterior, mărită de existența concentratorului. Fenomenul se repetă sub efectul amplificării reciproce a intensității celor două elemente determinante.

Coroziunea sub efort oscilant este influențată, dar nu este condiționată, de o serie de factori determinanți ai coroziunii sub tensiune. Astfel, ea se produce la aliaje, ca și la metale pure, în prezența unor medii corozive nespecifice.

Viteza coroziunii sub efort oscilant depinde de compoziția aliajului și de concentrația soluției agresive. Compoziția aliajului determină înălțimea treptei de lunecare. Astfel, la cupru pur, înălțimea treptei este ≈ 100 Å, la un aliaj concentrat Fe—Ni—Cr este de ordinul 10^3—10^4 Å. Concentrația soluției reduce în mod însemnat durata de funcționare. Astfel, s-au efectuat probe în aer asupra unui oțel de palete de turbină (X 20 Cr 13 W), cu un efort oscilant de $\pm$ 392 N/mm², care a manifestat o bună rezistență de durată. La un efort oscilant mai mic și anume $\pm$ 294 N/mm², dar în soluție apoasă de NaCl, s-a produs ruperea după 160 000 cicluri.

Fisura produsă prin coroziune sub efort oscilant este în cea mai mare parte transcristalină, ca și fisura produsă sub efort oscilant. În ambele cazuri, suprafața de rupere are un aspect caracterizat prin fîșii lamelare, separate prin linii de rupere. La coroziunea sub efort oscilant, se observă însă zone întinse de cristale cu suprafețele descoperite și cu carburi separate, ceea ce nu se observă la fisurarea sub efort oscilant [3.104].

Pentru comparație, este de menționat faptul că suprafața de rupere produsă de un efort static de întindere are un aspect de fagure. În timpul alungirii plastice sub un efort de întindere, se formează mici cavități,

în punctele de defect ale materialului (incluziuni, segregări, pori produși de gaze etc). Materialul continuu din jurul lor se întinde și se gîtuiește în continuare pînă la rupere, cînd conferă suprafeței de rupere aspectul de fagure [3.105].

Coroziunea sub efort oscilant în apă-abur. Coroziunea sub efort oscilant în cazanele de abur se produce din cauza și în timpul perioadelor de pornire-oprire, prin solicitarea crescută a metalului și se amplifică în perioadele de oprire. În aceste perioade, se produce coroziune de oprire în contact cu apa rece și oxigenată pe porțiunile de metal de bază, descoperite prin deteriorarea stratului protector sub efectul amplitudinii ridicate a solicitării în timpul perioadelor tranzitorii. În procesul de coroziune în tambur, suprafața descoperită de dimensiune mică reprezintă anodul, iar restul suprafeței interne a tamburului constituie catodul. Se produce astfel un proces intens de dizolvare locală a fierului, care nu se autolimitează. Pe de altă parte, coroziunea de oprire înmulțește numărul amorselor potențiale de fisurare sub tensiune în timpul funcționării. Coroziunea sub tensiune în apă fierbinte degazată progresează la modificare ciclică cu frecvența coborîtă a solicitării, ca o fisură prin obosire, sub efort mecanic oscilant. Prin pătrunderea de lichid în fisură se formează pe pereții acesteia magnetită. Fisura are o secțiune îngustă și practic constantă.

Coroziunea de oprire se manifestă pe flancurile neprotejate ale frontului fisurii, formînd un mic crater. După oprire și sub efectul apei fierbinți, urmează în exploatare o perioadă de formare de magnetită pe pereții craterului, astfel că la următoarea oprire el este protejat pe flancuri contra coroziunii de oprire. Pe fundul lui, datorită suprasolicitării din perioada tranzitorie se crează o nouă fisură, sub care se formează un nou crater. În acest fel se formează în timp o fisură, cu secțiune alternativ îngustată și lărgită (fig. 3.57). Coroziunea sub efort oscilant se produce cu precădere în zonele concentratoare de tensiuni. Exemple de tambure avariate sînt discutate pe larg în [3.37].

Fisurarea paletelor de turbină cu abur prin coroziune sub efort oscilant se poate manifesta și în absența altor forme de coroziune ale suprafeței

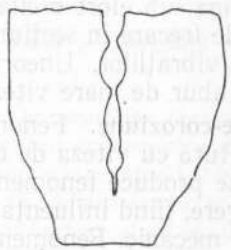


Fig. 3.57. Fisură produsă prin coroziune sub efort și combinată cu coroziune de repaus.

paletelor. Suprafața de rupere este netedă și nu prezintă diferențe macroscopice, față de o suprafață de rupere la obosire mecanică. Microscopic există însă diferențe. În cazul ruperii sub efectul obosirii mecanice, fisurile se produc transcristalin, iar în cazul coroziunii sub efort oscilant fisurile sînt alternativ, pe porțiuni succesive, transcristaline și intercristaline [3.54].

Coroziunea sub efort oscilant a paletelor de turbină se produce în treptele care lucrează în domeniul aburului umed, dar mai ales în zona situată în apropierea curbei limită de saturație. În această zonă, se formează pe paletă o peliculă de condensat. Această peliculă este agresivă dacă conține cloruri. Fisura se produce sub efectul combinat al solicitării dinamice și al coroziunii, oricare dintre aceste două cauze putînd fi predominantă. Contribuția fiecărei din aceste două cauze este indicată de ponderea aspectului transcristalin, respectiv intercristalin, al fisurii.

Trebuie menționat faptul că fisura poate fi amorsată într-un timp foarte scurt, dacă condițiile de producere sînt favorabile. Astfel, o înrăutățire temporară a calității agentului termic apă-abur, caracterizată prin creșterea conținutului de săruri, cauzată de pătrunderea de apă brută în condensator, poate constitui cauza inițială a fisurării paletelor [3.90].

Și la palete coroziunea sub efort oscilant este amorsată cu precădere în zone cu defecte superficiale ca anomalii ale rețelei cristaline și diferențe de compoziții sau structuri. S-a dovedit experimental că incluziunile de oxizi sau silicați formează în acest sens zone privilegiate. În cazul elaborării neîngrijite a oțelului, asemenea incluziuni nemetalice ajung prin prelucrare la suprafața paletelor și constituie amorse de coroziune. Durata de funcționare a paletelor poate fi mult redusă, ca urmare a unor astfel de defecte de material, chiar dacă au o structură cristalină bună și proprietăți mecanice normale [3.106].

Coroziunea sub efort oscilant în apă de răcire se manifestă în țevi prin fisuri transversale, transcristaline. Eforturile mecanice, care produc acest gen de fisuri, pot fi de frecvență coborîtă sau de frecvență ridicată. În primul caz, originea fisurii este deobicei un crater de coroziune. Variația solicitărilor se produce ca urmare a punerii repetate în funcțiune a schimbătorului de căldură. Fisurile au forma de pană ascuțită spre partea finală.

Coroziunea sub efort oscilant de frecvență ridicată este caracterizată prin benzi de frecare în secțiunea de rupere a materialului. Ele se produc sub efectul vibrațiilor. Uneori aceste vibrații sînt produse sub efectul fluxului de abur de mare viteză care trece printre țevi [3.90].

Eroziune-coroziune. Fenomenul de eroziune-coroziune se află în directă legătură cu viteza de curgere a mediului din țeavă. Viteza limită peste care se produce fenomenul depinde de materialul țevii și de condițiile de curgere, fiind influențată de turbulență. Mecanismul de producere nu este pur mecanic. Fenomenul este inițiat prin desprinderea incipientă

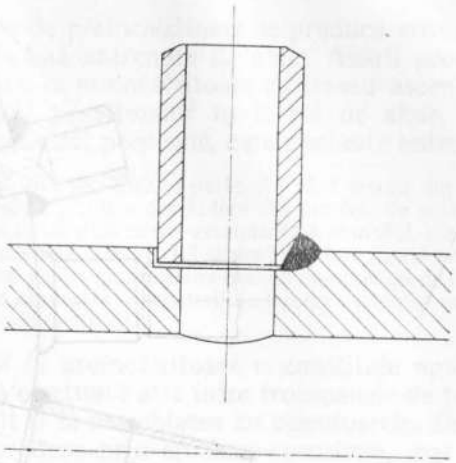


Fig. 3.58. Legătură prin sudură într-un orificiu cu fund plat al peretelui colectorului de apă la un preîncălzitor regenerativ [3.108].

a stratului de protecție a suprafeței țevii, sub efectul unui fenomen de coroziune. În continuare el este desprins sub efortul forțelor de forfecare, produse prin curgerea lichidului.

În mediu coroziv, se formează în țeavă două straturi superficiale, poroase, cu activitate catodică, respectiv anodică. În locurile expuse hidrodinamic cu viteze locale mari, se amplifică transportul de produse de coroziune prin porii straturilor. În acest fel, se intensifică reacția anodică și descompunerea stratului protector, în urma hidrolizei ionilor metalici. Prin progresul atacului chimic, se intensifică slăbirea legăturii cu materialul de bază și, sub efectul vitezei mari a lichidului, se produce desprinderea stratului protector. Viteza ridicată a lichidului împiedică de asemenea procesul de refacere a stratului protector cu produse stabile de coroziune.

Cele mai periclitate puncte sînt acelea în care lichidul are o viteză ridicată de curgere și anume muchiile plasate în curent, variațiile bruște de secțiune și coturile cu rază de curbură mică și secțiune ovalizată [3.107].

Exemplul 3.28. S-a constatat eroziune-coroziune pe muchiile neracordate din legătura cu colectorul ale ștuțurilor țevilor. Ele au constituit un element perturbator al circulației, eventual în asociere cu alte detalii, ca de exemplu interstițiul îmbinării dintre țeavă și colector, prezentate în fig. 3.58. Este interesantă posibilitatea ca, la o execuție identică a legăturilor la același colector, fenomenul de eroziune-coroziune să apară numai la o parte din țevi și în zonele corespunzătoare ale colectorului. Explicația constă în

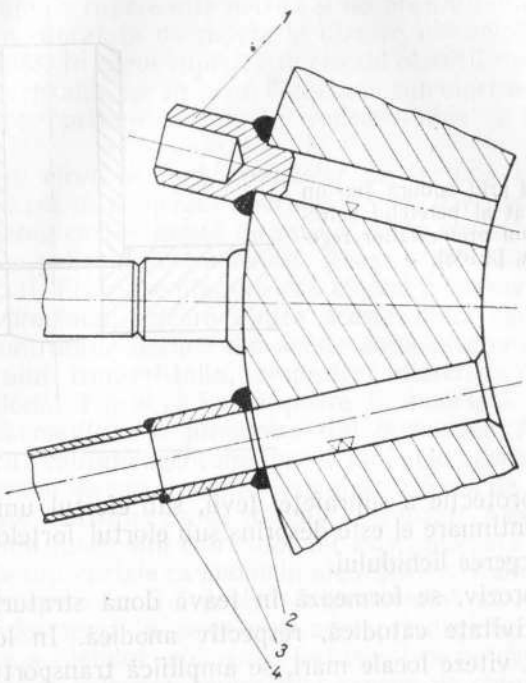


Fig. 3.59. Colector de apă de alimentare al unui preîncălzitor regenerativ, cu nipluri de legătură sudate şi găurite ulterior [3.108]:
1 — niplu înaintea probei de presiune; *2* — sudură electrică; *3* — niplu după proba de presiune; *4* — sudură autogenă.

variaţia treptată a vitezei apei dealungul colectorului. În fig. 3.59 este prezentat un tip perfecţionat de legătură între ţevi şi colector. Niplurile de legătură sînt sudate de colector, fără a fi complect găurite. Găurirea se face după proba hidraulică.

În zonele colectoarelor şi ţevilor, atacate în interior prin eroziune-coroziune, se constată pe suprafaţa exterioară o coloraţie diferită de cea normală. Explicaţia pare să fie trecerea unor curenţi electrici prin perete, în zonele în care, stratul interior de $Fe(OH)_2$, slab conducător de electricitate, este deteriorat. Curenţii sînt generaţi sub efectul diferenţei de potenţial create prin frecare în curentul de apă, care este foarte pură şi slab conducătoare de electricitate. Aceşti curenţi electrici influenţează procesul de oxidare externă a colectorului sau a ţevii [3.108].

Exemplul 3.29. Se citează fenomene de eroziune-coroziune cauzate de viteza prea mare a apei în preîncălzitoarele de înaltă presiune ale unor blocuri de 200 MW. Avarii prin eroziune-coroziune se produceau în mod frecvent după perioade de funcţionare de 3—5 ani. Viteza apei de 2,5—2,8 m/s depăşea valoarea critică. Pentru reducerea vitezei apei, s-a modificat conexiunea unor fascicule de ţevi, de la serie la paralel. În acest fel s-a realizat şi o economie de energie de pompare [3.109].

Şi pe partea de abur a ţevilor de preîncălzitoare se produce eroziune-coroziune, de către picăturile de apă antrenate de abur. Avarii produse în acest fel se semnalează mai ales la preîncălzitoare cu traseu ascendent al aburului. Datorită neuniformităţii vitezelor în fluxul de abur, este posibilă acumularea locală de condensat pe şicane, care apoi este antrenat.

Exemplul 3.30. La preîncălzitorul din fig. 3.60, o parte din abur trecea din zona de desupraîncălzire în zona de condensare, printr-o deschidere din peretele de separare. Picăturile de condensat, care se formau la sfîrşitul cursei ascendente a aburului, mai ales la sarcină parţială nu mai puteau fi antrenate peste vîrful şicanei de către fluxul restant de abur. Condensatul scurs înapoi în zona de desupraîncălzire era din nou preluat de fluxul de abur, care îl antrena peste ţevi. Prin obturarea deschiderii de trecere s-a evitat producerea în continuare a unor avarii similare [3.108].

O cauză frecventă de avarii la preîncălzitoare o constituie apariţia de pori în cusăturile prin sudură efectuată atît între tronsoanele de ţeavă componente ale serpentinelor, cît şi la asamblarea cu colectoarele. Defecţiunile la suduri pot fi şi ele produse prin eroziune-coroziune, mai ales în cazul existenţei de bavuri [3.110].

Fenomenul de eroziune-coroziune poate fi constatat şi în condensatoare pe partea de apă de răcire, mai ales în porţiunea de intrare a ţevilor

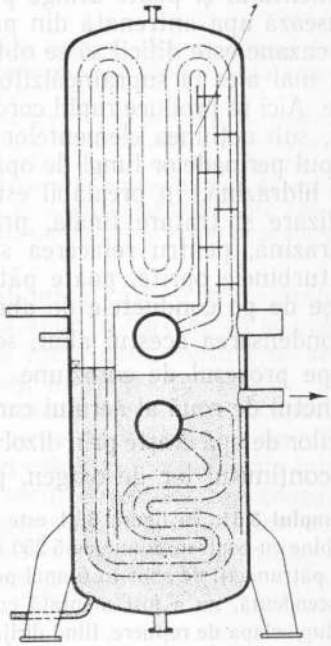


Fig. 3.60. Secţiune schematică printr-un preîncălzitor de înaltă presiune, cu zonă ascendentă de desupraîncălzire [3.108]:
1 — deschidere de trecere a aburului supraîncălzit.

și poate fi amorsat de nisip antrenat cu apa sau de bule de aer formate în urma creșterii în timpul verii a temperaturei apei de răcire. Din motivele arătate, se produce o mișcare turbulentă elicoidală la intrarea în țevi. Este de presupus că punctele de eroziune-coroziune, care apar în mod izolat în lungul țevilor, sînt cauzate de corpuri străine, fixate temporar în acele puncte, care au deranjat curgerea normală a lichidului [3.107].

Coroziunea de staționare. În perioadele de opriri repetate (de exemplu în golurile de sarcină duminicale), dar mai ales în perioadele mai lungi de reparații, se pot produce coroziuni în toate echipamentele circuitului termic. În acest caz coroziunea este provocată de oxigenul dizolvat în picăturile de apă de pe suprafețele metalice.

Apa, care stagnează în echipamente, provine fie din restul neevacuat după oprire, din pătrunderi de abur prin armături neetanșe sau din umiditatea aerului, care vine în contact cu suprafețe reci. Pe bază de experimentări, s-a constatat că aerul avînd o umiditate relativă sub 50% nu este periculos din punctul de vedere al coroziunii. De aceea, prin metodele de conservare aplicate echipamentelor oprite, se tinde spre menținerea unei umidități sub 50% a aerului, în zonele cele mai reci ale echipamentului. Vehicularea de aer preîncălzit prin echipament nu este totdeauna eficace, deoarece temperatura sa coboară treptat în timpul parcurgerii echipamentului și poate atinge punctul de rouă în zone mai reci, unde condensează apa antrenată din partea inițială a echipamentului [3.111].

La cazane este dificil să se obțină o stare uscată a suprafețelor interioare și mai ales la supraîncălzitor, care conține porțiuni care nu pot fi drenate. Aici se produce rapid coroziunea în adîncime, din cauza accesului aerului, sub acțiunea elementelor de concentrare neuniformă cu oxigen. În timpul perioadelor lungi de oprire, cazanele mari se conservă cu amoniac și hidrazină. În prealabil este ncesară o curățire acidă, urmată de neutralizare și tratare finală, prin funcționare timp de trei zile cu adaus de hidrazină, pentru refacerea stratului protector de oxizi [3.99].

În turbinele oprite, poate pătrunde abur prin organele de închidere neetanșe de pe conductele de abur viu, de priză sau de contrapresiune. Prin condensarea acestui abur, se formează apă pe suprafața metalului și începe procesul de coroziune. Se poate forma apă și la temperaturi sub punctul de rouă al aerului care pătrunde în turbină. Conductivitatea picăturilor de apă crește prin dizolvarea depunerilor de pe palete. Simultan crește conținutul lor de oxigen, provenit din aerul pătruns în turbină.

Exemplul 3.31. În figura 3.61 este arătată schema de principiu a conductelor unei turbine cu contrapresiune de 5 250 kW, care a suferit o grea avarie prin coroziune, în urma pătrunderii de abur în timpul perioadelor de oprire [3.128]. Aerisirea *8*, cu evacuare ascendentă, nu a fost montată conform proiectului între robinetele cu sertar *1* și *2*, ci după clapa de reținere, fiind dirijată spre planșeul subsolului. În timpul opririlor,

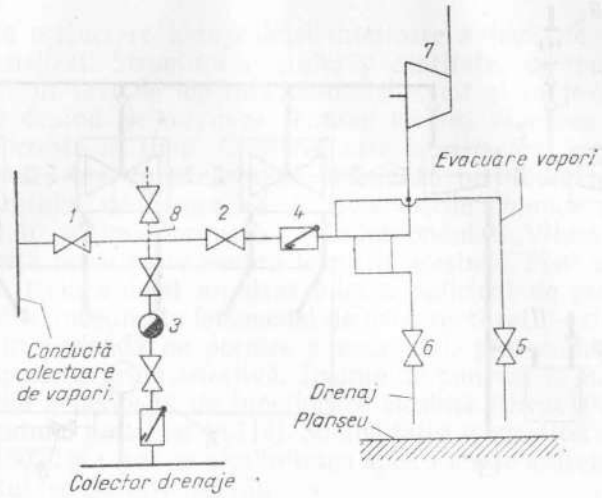


Fig. 3.61. Schemă de conducte pe partea de contrapresiune a unei turbine [3.128]:
1 și *2* — vane de închidere; *3* — drenaj automatizat; *4* — clapă de reținere; *5* și *6* — ventile de închidere; *7* — turbină cu abur; *8* — aerisire nemontată.

personalul de exploatare nu a închis decît robinetul cu sertar *1*, care era neetanș. În acest fel, în perioadele de oprire a pătruns în turbină abur provenit din conducta colectoare, la care era conectată pe partea de contrapresiune.

Exemplul 3.32. [3.112]. Coroziunea de staționare este accelerată cînd picăturile de condensat rămase pe suprafețele metalice sînt impurificate cu săruri. În supraîncălzitorul unui cazan, s-au produs coroziuni puternice de staționare, caracterizate prin cratere de coroziune de diametru mare, provenite din unificarea punctelor inițiale de coroziune. Sărurile conținute în condensat erau sulfați de calciu și natriu, proveniți din apa de injecție. Coroziunea se accelerează pe măsura creșterii concentrației saline în urma evaporării apei.

Pentru prevenirea coroziunii de staționare, este recomandabil ca pe conductele prin care poate să pătrundă abur în turbină să se prevadă un tronson de blocare, care să cuprindă între două ventile o aerisire verticală, la partea superioară și un drenaj, în partea inferioară.

Pentru conservarea unei turbine, se poate trece prin corpurile ei un curent de aer uscat (fig. 3.62). Aerul uscat se obține într-un uscător prin adsorbție. Acesta se compune dintr-un rotor cu multe canale înguste, impregnat cu un adsorbant. În timp ce aerul de conservare cedează în uscător umiditatea sa, acesta este regenerat într-un sector al său, prin trecerea unui curent de aer preîncălzit, care preia umiditatea de la adsorbant. Aerul de conservare beneficiază și de preîncălzire, în cursul procesului de uscare [3.111].

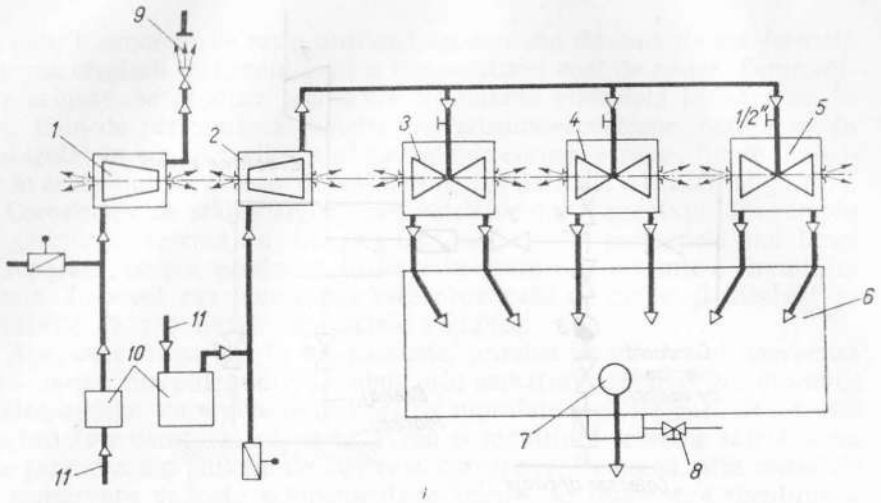


Fig. 3.62. Schemă de principiu a traseului aerului uscat pentru conservarea în repaus a unei turbine de 515 MW [3.111]:

1 — corp de înaltă presiune; *2* — corp de medie presiune; *3* — corp de joasă presiune *1*; *4* — corp de joasă presiune *2*; *5* — corp de joasă presiune *3*; *6* — condensator; *7* — gură de vizitare; *8* — ventil închis; *9* — ventil de reținere demontat; *10* — uscător de aer; *11* — aer ambiant.

Rugozitatea stratului de magnetită. Stratul de magnetită se compune din două straturi, cel interior, tridimensional, topotactic, fiind compact și interpătruns cu metalul de bază. Stratul exterior este format dintr-o rețea de cristale dezvoltate bidimensional (epitactic). Ambele straturi se dezvoltă în exploatare, după o funcție de timp parabolică. În anumite condiții, stratul exterior în creștere ia o formă ondulată, care mărește în mod sensibil căderea de presiune în cazan.

Exemplul 3.33. Cu ocazia măsurărilor efectuate pe un cazan nou de 650 t/h de tip Benson, s-a constatat o creștere cu 55% a căderii de presiune în sistemul compus din economizor și vaporizator, la 11 500 ore de funcționare după punerea în funcțiune. După o spălare acidă, căderea de presiune a scăzut, pentru ca să crească din nou cu 41%, după alte 5 200 h de exploatare. Au fost efectuate cercetări asupra cauzelor și condițiilor de creștere a căderii de presiune. Conform constatărilor efectuate, stratul exterior de magnetită era erodat în zone de turbulență a curgerii. Cristalele erodate au fost transportate de fluid și depuse în aval, în zonele din spatele ondulațiunilor transversale formate. În acest fel s-a accentuat forma ondulată a suprafeței interioare a stratului de magnetită. Fenomenul s-a produs la viteze medii de 2—8 m/s și temperaturi ale fluidului de pînă la 390°C. Suprafețele ondulate ale stratului de magnetită s-au constatat în special în fază lichidă a apei, în apropierea punctului de schimbare a fazei și în stare bifazică, pînă la un conținut de abur de circa 0,7 [3.113].

Starea de prelucrare a suprafeței interioare a țevii nu influențează fenomenul analizat. Structura stratului și cantitatea de magnetită sînt similare, atît în țevi de legătură neîncălzite, cît și în țevile încălzite, ca atare nu depind de mărimea fluxului termic. Mărimea ondulațiilor transversale crește în timp. Creșterea este cu atît mai înceată, cu cît oțelul țevii este mai puternic aliat. Presiunea nu influențează practic creșterea stratului de magnetită. Caracteristicile chimice ale fluidului influențează în schimb formarea stratului ondulat. Viteza de curgere are o influență hotărîtoare asupra formării acestuia. Pentru încetinirea fenomenului, trebuie creat un strat interior suficient de gros, deoarece în acest mod se încetinește fenomenul de oxidare. Stratul exterior trebuie îndepărtat în perioada de pornire a cazanului, prin suflare cu viteză ridicată și spălarea acidă selectivă. Înainte de punerea în funcțiune este recomandabilă o perioadă de funcționare alcalină (circa 100 h), pentru formarea stratului protector [3.114]. Solubilitatea magnetitei are o valoare maximă la 150°C și scade cu alcalinitatea apei. Ea este antrenată în cazan și din circuitul regenerativ [3.115].

Exemplul 3.34. Depunerile de magnetită în cazan pot produce avarii. Astfel, la un cazan Benson de 137 t/h, s-au produs spargeri în zona de vaporizare, ca urmare a reducerii circulației în cîteva țevi. Aceasta a fost cauzată de depunerile de magnetită pe duzele de uniformizare a circulației, montate la ieșirea din colectorul de intrare, în suprafața de vaporizare. Pentru prevenirea avariilor de acest fel, este necesar să se urmărească în mod sistematic evoluția căderii de presiune în suprafața de vaporizare și eventual temperatura în fascicolele de țevi montate în paralel [3.116].

3.2.2. Coroziunea exterioară

Cenușa antrenată și gazele de ardere din cazane conțin compuși corozivi, al căror efect se manifestă atît în zone de temperatură ridicată a metalului, cît și în zona de temperatură coborîtă a metalului. Coroziunea de înaltă temperatură se produce în supraîncălzitorul de abur viu și în supraîncălzitorul intermediar, iar coroziunea de joasă temperatură se produce în preîncălzitorul de aer, în canalele de gaze de ardere și în coșul de fum. La depășirea temperaturii nominale de funcționare, se produce o coroziune prin oxidare a metalului (scorii).

Coroziunea de înaltă temperatură. Coroziunea de înaltă temperatură este produsă de depuneri de cenușă, care au un punct coborît de topire. Ea este produsă în cazanele care ard păcură, de către compușii complecși de vanadiu, sulf și natriu. Compușii de vanadiu și natriu atacă stratul protector de oxid al țevii. Coroziunile produc pierderi de grosime a peretelui țevii de pînă la 0,75 mm/an. Unele eutectice ale componentelor cenușii au temperaturi de topire foarte coborîte, în jur de 600°C. Astfel,

compusul natriu-vanadil-5-vanadat ($Na_2O \cdot V_2O_4 \cdot 5V_2O_5$) are un punct de topire de 625°C. Din acest motiv, limita superioară a temperaturei aburului, peste care produsul de coroziune devine foarte activ, este de circa 540°C, temperatura corespunzătoare a metalului, fiind în acest caz aproape de limita de 600°C. Cenușă cu conținut ridicat de vanadiu și natriu se găsește în majoritatea sorturilor de păcură.

Prevenirea coroziunii de înaltă temperatură se realizează prin următoarele măsuri principale: limitarea temperaturii aburului la ieșirea din cazan la 540°C, funcționarea cu exces de aer foarte redus (ardere cvasi-stoichiometrică) și utilizarea de aditivi. Prin arderea cvasi-stoichiometrică, se reduce formarea de pentoxid de vanadiu (V_2O_5), care are o temperatură de topire mai coborîtă decît oxizii de valență inferioară (V_2O_4 și V_2O_3). Se evită în acest fel și formarea eutecticelor cu temperatură de topire coborîtă [3.117].

Aditivii formează cu constituienții cenușii compuși cu temperatură de topire ridicată și în acest fel previn formarea de depuneri corozive. Principalii aditivi sînt pe bază de magneziu sau oxid de magneziu. Raportul molar de dozare a magneziului aditivat față de vanadiu este 2 : 1.

Coroziunea de înaltă temperatură se produce și în cazanele care ard cărbuni. Se formează depuneri corozive, constituite din trisulfați de fier alcalini. Prin arderea cărbunelui, se produce SO_2, din care o parte se transformă în SO_3. Acesta împreună cu oxizii metalelor alcaline formează sulfați. Sulfații alcalini, oxidul de fier și anhidrida sulfurică intră în reacție și formează compuși sulfatici complecși. Aceștia reacționează în stare topită cu materialul de bază al țevii:

$$2Na_3Fe(SO_4)_3 + 6Fe \rightarrow \frac{3}{2}FeS + \frac{3}{2}Fe_3O_4 + Fe_2O_3 + \\ + 3Na_2SO_4 + \frac{3}{2}SO_2 \qquad (3.52)$$

Această reacție se autolimitează, însă reîncepe de îndată ce depunerile și oxizii formați sînt îndepărtați. Sub influența suflătoarelor de funingine, se produce astfel o uzură ciclică a țevilor, prin coroziune-eroziune.

Din experiențe de laborator, s-a constatat că aceste depuneri corozive se formează în special în intervalul de temperatură de 550—700°C. Fenomenul de coroziune depinde de conținutul de sulf și metale alcaline în cenușa cărbunelui. Starea topită a compușilor corozivi se caracterizează printr-o activitate intensificată. Temperatura de topire depinde de raportul dintre natriu și potasiu. La un raport de 1 : 1, se obține domeniul cel mai larg, cu cea mai coborîtă limită inferioară de temperatură de formare a fazei lichide a compușilor corozivi [3.118].

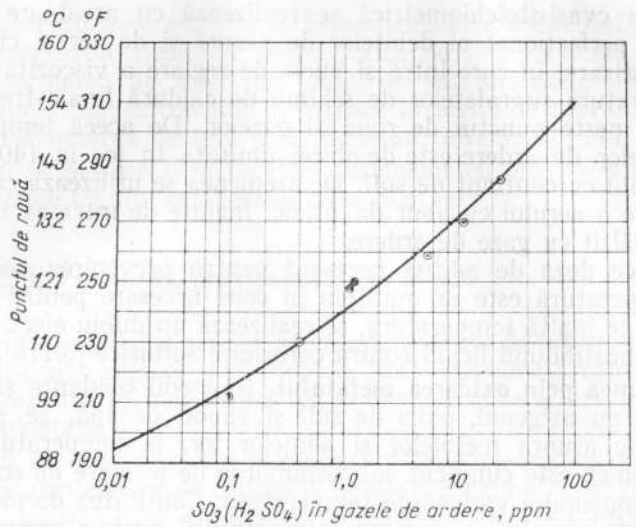


Fig. 3.63. Punctul de rouă în funcție de concentrația de H_2SO_4 [3.118]:
——— calculat; ⊙ măsurat.

Coroziunea de joasă temperatură. Anhidrida sulfurică (SO_3), împreună cu vaporii de apă din gazele de ardere, formează acid sulfuric. Acesta se condensează și atacă metalul la temperaturi aflate sub punctul de rouă al acidului. Punctul de rouă acid este definit ca temperatura la care gazele de ardere sînt saturate cu acid. El variază în funcție de concentrația de SO_3, în gazele de ardere (fig. 3.63). Corespondența între concentrația de SO_3 și punctul de rouă reprezentată în această figură a fost determinată în laborator. Anhidrida sulfurică se formează probabil prin oxidarea catalitică pe suprafețele de schimb de căldură de temperatură coborîtă. O altă teorie presupune formarea ei prin oxidare în flacără cu oxigen atomic sau molecular. Este sigur însă că formarea ei depinde de concentrația de oxigen din gazele de ardere, deci de excesul de aer.

Principala măsură pentru prevenirea coroziunii de joasă temperatură este arderea păcurii cu exces redus de aer, pentru a reduce cantitatea de anhidridă sulfurică. Dacă aceasta se menține sub valoarea de 10 mg/l, efectul de coroziune poate fi controlat. În acest scop, excesul de aer trebuie să fie de cel mult 2,5%, respectiv excesul de oxigen 0,5%. Coroziunea vanadică, de înaltă temperatură, se mai produce însă chiar și la aceste valori ale excesului de aer, la care coroziunea de joasă temperatură practic nu are loc.

Arderea cvasi-stoichiometrică se realizează cu arzătoare cu reglaj individual perfecționat al debitelor de păcură și de aer și cu aparataj de automatizare, în care intră și bucla de reglare a viscozității păcurii.

Temperatura suprafețelor de schimb de căldură finale trebuie să fie menținută peste punctul de rouă al gazelor. De aceea temperatura la coș a gazelor de ardere este de obicei limitată în jos la 140°C, pentru combustibilii cu conținut de sulf. De asemenea se utilizează calorifere de preîncălzire a aerului cu abur de priză, înainte de intrarea în preîncălzitorul încălzit cu gaze de ardere.

Deoarece doza de aditivi necesară pentru prevenirea coroziunii de joasă temperatură este un multiplu al celei necesare pentru prevenirea coroziunii de înaltă temperatură, se realizează un dublu efect, prin aditivarea combustibilului lichid contra coroziunii sulfurice [3.118].

Coroziunea prin oxidarea metalului. În medii oxidante și în special în contact cu oxigenul, oxizi de sulf și vapori de apă, se produce un atac chimic asupra metalelor și aliajelor lor, la temperaturi ridicate. Acest fenomen este cunoscut sub denumirea de formare de scorii. Intensitatea fenomenului variază cu temperatura. Cantitatea de metal oxidat crește foarte repede cu creșterea temperaturii peste o anumită limită, care reprezintă temperatura maximă de utilizare (fig. 3.64). Sub această

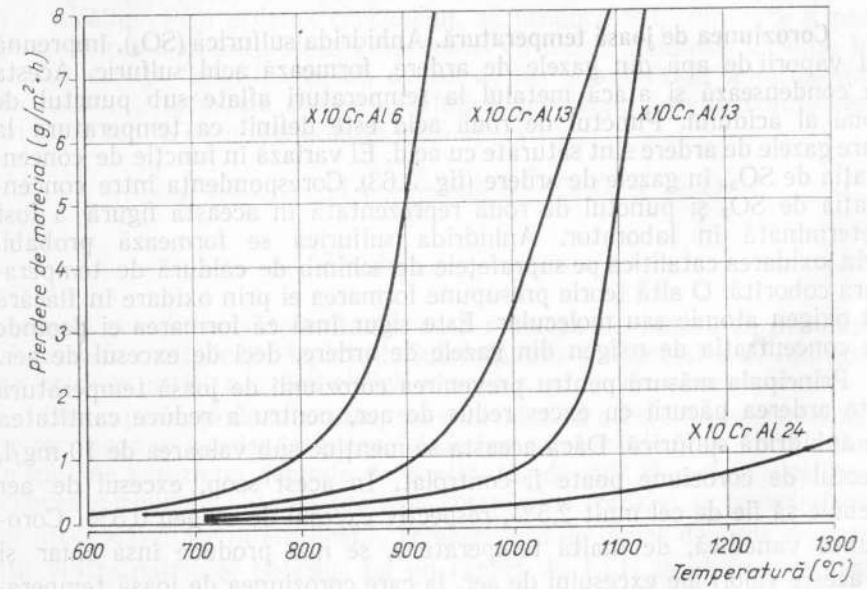


Fig. 3.64. Pierderi prin scorii ale oțelurilor CrAl, termorezistente, în aer [3.119].

limită, rata de coroziune este mică. Fenomenul este influențat în mare măsură de compoziția mediului. Astfel, oxizii de sulf participă în mod hotărîtor la formarea de scorii pe țevile de supraîncălzitor. Oxidarea exterioară a metalelor se constată în cazane la țevile de supraîncălzitor, precum și la suporturile de țevi și de material refractar [3.119].

Fenomenul se petrece și la paletele turbinelor cu gaze, sub depuneri de săruri, provenite din combustibil sau din aer.

3.2.3. Eroziunea prin cenușă zburătoare

Eroziunea prin cenușă a țevilor de cazane depinde de cîțiva parametri principali. Influența acestor parametri a fost determinată cantitativ în laborator și rezultatele încercărilor au confirmat constatările calitative făcute în exploatare.

Fenomenul de eroziune este aproximativ proporțional cu puterea a treia a vitezei particulelor de cenușă și poate fi exprimat printr-o relație empirică. În aceasta sînt cuprinși și ceilalți factori care influențează fenomenul de eroziune [3.120]. Valoarea exponentului vitezei variază în funcție de proprietățile cărbunelui. Astfel. în [3.120] este indicată valoarea de 3,22, iar pentru ligniții din Oltenia s-a determinat valoarea de 2,82 [3.121]. Cantitatea de cenușă influențează direct proporțional eroziunea metalului, iar eroziunea specifică, exprimată în grame de metal/tonă de cenușă, este practic constantă.

Fenomenul de uzură depinde în mare măsură de compoziția cenușii. Componenta care produce uzura cea mai puternică este bioxidul de siliciu. În aprecierea calității cenușii, trebuie însă să se facă o diferențiere chiar între particulele cu aceeași compoziție chimică. Particulele de bioxid de siliciu pot avea un contur neted sau cu asperități. Particulele în al căror contur există colțuri proeminente produc un efect de uzură pînă la de trei ori mai mare decît al particulelor netede. Temperatura de lucru a țevilor din curentul de gaze de ardere influențează indirect rata de eroziune. La temperatură ridicată, se formează un strat de scorii, caracterizat printr-o duritate ridicată. El constituie o protecție față de efectul eroziv al particulelor fine de cenușă. Particulele mari de cenușă au însă un efect destructiv asupra stratului de scorii, făcînd posibilă acțiunea particulelor fine pe suprafața rămasă neprotejată. Granulația cenușii influențează eroziunea în funcție de temperatură, material și mod de eroziune. Eroziunea prin alunecare — frecare este mai periculoasă decît eroziunea prin impact. Particulele fine erodează metalul prin alunecare cu frecare, iar cele grosiere prin impact.

Modul de dispunere a țevilor are și el efect asupra eroziunii. Așezarea alternată a țevilor favorizează eroziunea, în comparație cu așezarea în coloană. Se constată o creștere însemnată a uzurii prin eroziune a țevilor așezate în fascicule cu pași mai mici decît 2,5 d. La așezarea alternată, se constată o uzură mai mare a celui de al doilea și uneori al treilea rînd de țevi din fascicol, decît al primului rînd. La așezarea în coloană, primul rînd este întotdeauna cel mai erodat [3.122].

Prin așezarea alternată, se ameliorează schimbul de căldură, dar eroziunea crește aproximativ de trei ori la țevile cele mai expuse, față de așezarea în coloană [3.121]. Din acest motiv, la cazanele care ard combustibil solid, se preferă întotdeuna așezarea țevilor în coloană.

În general, fenomenul de eroziune depășește valori admisibile atunci cînd viteza gazelor de ardere care antrenează particulele de cenușă depășește 10 m/s. Avînd în vedere neuniformitatea vitezei în fluxul de gaze, se recomandă adoptarea unei viteze medii de 8,5 m/s. Valorile arătate pot varia în funcție de condițiile particulare ale fiecărui cazan. Pe de altă parte, viteza gazelor de ardere este proporțională și cu sarcina cazanului. Eroziunea cumulată în timp crește deci cu numărul de ore de utilizare a debitului instalat.

În unele zone ale cazanului, gazele au viteze locale mult mai mari decît cele medii de calcul. În culoarele libere dintre fascicolele de țevi și pereți viteza este de patru pînă la cinci ori mai mare decît în regiunea țevilor [3.123].

Viteza gazelor de ardere crește în secțiunile situate după zone cu depuneri de zgură. Schimbul de căldură în aceste zone fiind înrăutățit, temperatura gazelor de ardere și volumul specific nu scad în măsura prevăzută prin proiect și viteza lor o depășește pe cea de proiect. Depunerile de zgură produc și prin reducerea secțiunilor de trecere o creștere a vitezei gazelor de ardere.

Sînt cazuri cînd fenomenul de depunere a zgurii, combinat cu fenomenul de eroziune, este generat de variații importante de calitate a combustibilului. Într-o perioadă de ardere a cărbunelui cu conținut scăzut de cenușă și putere calorică ridicată, se produc depuneri de zgură din cauza temperaturilor mai ridicate pe traseul gazelor de ardere și deci reduceri ale secțiunilor de trecere. În perioada următoare, cînd se arde un combustibil cu conținut ridicat de cenușă, fluxul de gaze de ardere transportă o cantitate mare de particule de cenușă cu viteză mărită în secțiunile îngustate prin depuneri. În acest fel sînt create condiții favorabile pentru eroziune.

Particulele de cenușă pot atinge viteze inadmisibile chiar dacă viteza gazelor de ardere se menține în limite admisibile. La trecerea prin fascicolele de țevi, mișcarea lor este permanent frînată prin ciocnirea cu țevile. Astfel, particulele de cenușă au o viteză mai scăzută decît gazele de ardere. La parcurgerea unor spații libere, ele sînt din nou accelerate. Din această cauză, se poate constata o eroziune mărită pe coturile de țeavă care mărginesc coridoarele libere, precum și pe țevile din primul rînd al unui fascicol situat după un spațiu de trecere liberă a gazelor de ardere.

Concentrarea de cenușă în gazele de ardere nu este uniformă. La modificările de direcție a fluxului gazelor se produce din cauza forței centrifuge o concentrare de cenușă în vinele exterioare ale curentului de gaze. Astfel de concentrări se produc pe peretele din spate al celui de al doilea drum al gazelor de ardere, la cazanele în formă de Π. În această zonă, se produc eroziuni accentuate la coturile serpentinelor, precum și la țevile verticale de legătură între trepte. Cazanele turn, cu un singur drum al gazelor de ardere, nu comportă modificări de direcție ale acestora și de aceea sînt adecuate pentru combustibili cu conținut ridicat de cenușă. Efectul antieroziv al traseului drept este accentuat prin sensul de curgere al gazelor de ardere, contrar gravitației, prin care se frînează particulele de cenușă și se produce o separare parțială a fracțiunilor mari. De aceasta beneficiază supraîncălzitoarele primare și intermediare, la care stratul de scorii este afectat, din cauza temperaturii lor ridicate, de efectul eroziv al granulelor mari de viteză ridicată [3.124].

În toate zonele în care se produc accelerări sau concentrări ale particulelor de cenușă, se montează protecții locale sau elemente de uniformizare (fig. 3.65). De asemenea se evită pe cît posibil crearea unor porțiuni de traseu cu parcurs liber al gazelor de ardere.

Eroziunea prin cenușă se manifestă intens și la ventilatoarele de gaze de ardere. Ea este influențată în măsură însemnată de gradul de reținere a cenușei în electrofiltre. La cazane ale căror electrofiltre realizau un grad de reținere pentru granulația grosieră de peste 25 μm, mai scăzut decît valoarea medie pentru întreg spectrul de granulație, s-a constatat o eroziune mai puternică a ventilatoarelor de gaze, decît la cazane ale căror electrofiltre aveau o eficacitate mai bună în reținerea fracțiunilor mari. Se recomandă ca gradul de reținere realizat pentru fracțiunile peste 25μm să fie cel puțin egal cu gradul de reținere global, iar acesta să fie cît mai bun. Viteza gazelor de ardere în electrofiltru ar trebui să fie mai mică decît 3 m/s, la un debit cu 10% mai mare decît debitul nominal și durata de parcurgere a filtrului de către gaze să fie mai mare decît 3 s [3.124].

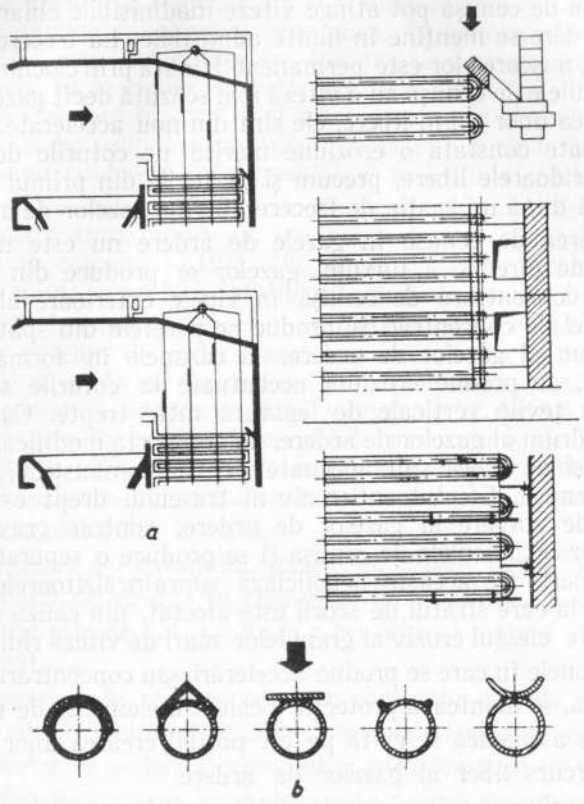


Fig. 3.65. Protecții contra eroziunii prin cenușă zburătoare [3.123]:
a — uniformizarea concentrației și frînarea cenușei; *b* — piese de protecție sudate pe țevi.

3.2.4. Eroziunea prin jet sau picături de apă

O cauză externă a avarierii țevilor vaporizatoare o constituie eroziunea prin suflătoarele de funingine dereglate. Asemenea cazuri se pot produce de exemplu la suflătoarele amplasate prea aproape de colțurile focarului, unde bat în țevile de pe peretele adiacent celui pe care sînt montate.

Un alt caz este cel al suflătoarelor deformate din cauza solicitărilor termice. Acestea bat în țevi, în loc să acționeze pe tangenta la țevi.

Eroziunea apare în unele cazuri ca o extindere a defecțiunilor provenite din alte cauze. Astfel, la țevile de economizor, se produc pori la suduri sau perforări prin eroziunea cu cenușă, prin care ies jeturi de apă,

a căror viteză este mare, datorită presiunii ridicate din țeavă. Jeturile de apă, care sînt îndreptate spre țevi învecinate, le deteriorează pe acestea prin eroziune. Pe de altă parte, ele măresc cu timpul orificiul prin care trec.

În cursul unor probe efectuate pentru caracterizarea cantitativă a acestor fenomene au fost obținute următoarele rezultate [3.125]: cantitatea de apă pierdută printr-o scăpare din o țeavă fabricată din oțel slab aliat (15 Mo 3) se dublează după 3 zile, pe cînd la oțeluri înalt aliate creșterea este mică, chiar după 20 zile; o țeavă din oțel slab aliat (15 Mo 3) a fost perforată sub acțiunea unui jet de apă, după 8 zile, iar o țeavă din oțel aliat (10 CrMo 910) a fost perforată după 20 zile.

La turbinele cu abur, paletele treptelor care funcționează în domeniul de abur umed sînt supuse acțiunii picăturilor de apă, care le erodează. Paletele cu un stadiu avansat de erodare își modifică frecvența proprie de vibrație și astfel, în unele cazuri, sînt supuse pericolului de rezonanță și de rupere la efort oscilant de mare amplitudine. Pe de altă parte, este posibil să se rupă ca urmare a slăbirii prin eroziune a secțiunii, mai ales că zonele erodate au margini ascuțite, care au un efect de concentrare a tensiunilor.

Eroziunea se produce mai ales pe dosul muchiilor de intrare ale paletelor, pe care picăturile de apă le lovesc după cum rezultă din construcția triunghiurilor de viteze (fig. 3.66). Suprafața paletei este supusă unui puternic șoc de presiune în momentul impactului picăturii de apă. Materialul suferă o deformație plastică. Din repetarea șocurilor și a deformațiilor rezultă tensiuni interne, a căror valoare crește, pînă cînd, depășind rezistența la rupere, se produc fisuri superficiale. Acestea se multiplică și se interpătrund, pînă cînd mici fragmente de material sînt smulse de pe suprafața sa.

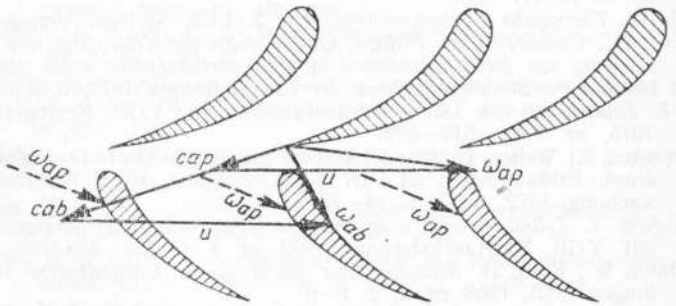


Fig. 3.66. Eroziunea paletelor prin picături de apă:
c — viteză absolută; *u* — viteză de rotație; *w* — viteză relativă; *ap* — apă; *ab* — abur.

Intensitatea fenomenului de eroziune este influențată de cantitatea de apă din abur, de viteza de impact a picăturilor, de unghiul de impact, de dimensiunile picăturilor și de frecvența șocurilor. Picăturile de dimensiuni mici sub formă de ceață sînt antrenate de abur și de aceea nu au efect eroziv. Acesta este produs de picăturile mari, care se formează pe muchia de ieșire a paletelor fixe.

Pentru diminuarea eroziunii, se tratează muchiile de intrare ale paletelor mobile, pentru a le mări rezistența. Măsurile constructive de prevenire a eroziunii sînt de două categorii. În prima categorie sînt măsurile destinate să evacueze apa formată, iar a doua categorie măsurile prin care se reduce numărul și dimensiunile picăturilor de apă [3.126].

BIBLIOGRAFIE

3.1. Albrecht, W. *Zulässige instationäre Wärmespannungen.* În: Brennstoff-Wärme-Kraft, 1966, nr. 1, p. 10–19.

3.2. Mitescu, C. *Rezistența materialelor.* Editura Didactică și Pedagogică, București, 1967.

3.3. Makinejad, N. *Dynamische Lochrandspannungen und zulässige Temperaturdifferenzen in rotationssymmetrischen belasteten zylindrischen Bauteilen grösserer Dampferzeuger.* VGB Kraftwerkstechnik, 1974, nr. 3, p. 186–194.

3.4. Pavel, A. Notă tehnică. Oțelurile în construcția conductelor termoenergetice. Oficiul de Documentare Energetică, București, 1971.

3.5. Bettzieche, P. *Ausgewählte Werkstoffprobleme bei der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Dampferzeugung unter besonderer Berücksichtigung der Zeitstandfestigkeit.* În: Mitteilungen VGB, 1965, nr. 98, p. 303–310.

3.6. Dittmar, S. *Die Finite-Element-Methode im Rahmen der Festigkeitsberechnung an überwachungspflichtigen Bauteilen.* În: VGB, Kraftwerkstechnik, 1974, nr. 6, p. 411–418.

3.7. Traupel, W. *Thermische Turbomaschinen*, vol. 2, 1968, Springer Verlag.

3.8. Bernstein, W., Gernhardt, A., Pflüger, O. *Methoden der Vorhersage und der Überwachung von Beanspruchungen in Kraftwerksbauteilen unter dem Einfluss instationärer Betriebsverhältnisse.* În: Energietechnik, 1972, nr. 6, p. 256–262.

3.9. Hohn, A. *Lebensdauer von Dampfturbinenbauteilen.* În: VGB, Kraftwerkstechnik, 1975, nr. 8, p. 519–529.

3.10. Schwaigerer, S., Weber, E. *Wanddickenberechnung von Stahlrohren gegen Innendruck.* Erläuterungen zu DIN 2 413, Ausgabe, 1972. Technische Überwachung, 1972, nr. 3, p. 74–78.

3.11. Schwaigerer, S. *Zylinderschalen unter innerem Überdruck.* Erläuterungen zur TRD 301. VGB, Kraftwerkstechnik, 1972, nr. 4, p. 352–358.

3.12. Ruttmann, W., Kaes, H. *Bedeutung der Änderung der Langzeitwerte* În: Mitteilungen VGB, 1968, nr. 1, p. 1–9.

3.13. Ulrich, E. *Beitrag zur Berechnung hochbelasteter Kessel – und Überhitzerrohre.* În: Brennstoff-Wärme-Kraft, 1966, nr. 7, p. 339–344.

3.14. Technische Richtlinien für Dampfkessel (TRD) 307.

4. LOCALIZAREA UNOR DEFECȚIUNI ÎN ECHIPAMENTELE TERMOMECANICE ALE CENTRALELOR ELECTRICE

Posibilitatea de detectare a defecțiunilor în stadiu incipient este deosebit de utilă pentru prevenirea avariilor la echipamentele termomecanice. Modificarea unor parametri de funcționare poate să dea indicații în acest sens. În unele cazuri este posibilă și localizarea defectelor.

În scopul arătat, se analizează modificările produse în timp în valoarea vibrațiilor și în performanțele turbinelor cu abur, în valorile parametrilor aburului realizate în cursul destinderii în turbină, în proprietățile oțelului la cazane, turbine și conducte. Se cercetează modul de măsurare și interpretare și a variației nivelului de zgomot din mașinile rotative (turbine și compresoare) și a modificării lente a cîmpului de temperatură în carcasele mașinilor rotative ; pînă în prezent acestea nu au găsit o aplicare largă.

4.1. MODIFICAREA VIBRAȚIILOR

Măsurarea și înregistrarea vibrațiilor arborelui este una dintre cele mai importante metode de supraveghere a funcționării turbinelor [4.1]. Ea este completată de măsurarea vibrațiilor lagărelor. Prin cunoașterea mărimii și evoluției în timp a vibrațiilor unei mașini rotative este posibilă detectarea din timp a modificărilor survenite în rotor, ca urmare a unor defecțiuni și prevenirea extinderii acestora. Vibrația arborelui este mai sensibilă la modificările din rotor decît vibrația lagărului. Aceasta este o manifestare a dezechilibrului din rotor, prin intermediul peliculei de ulei și a lagărului însuși. Vibrația lagărelor se manifestă cu o anumită inerție și cu amplitudini mai mici decît vibrația arborelui.

Vibrația arborelui poate fi măsurată ca mărime absolută sau ca mărime relativă și anume mișcarea relativă între arborele aflat în rotație și statorul turbinei. Cea mai răspîndită este măsurarea vibrației relative

a arborelui. Mărimea măsurată poate să fie amplitudinea maximă a vibrației (μm) sau viteza de vibrație (mm/s). În general se măsoară amplitudinea maximă, însă la turbinele industriale și la turbocompresoare de turație ridicată se măsoară adesea și viteza de vibrație.

Vibrația absolută a lagărelor se măsoară cu traductori seismici, construiți dintr-o bobină, suspendată prin intermediul unui arc, care se mișcă în cîmpul unui magnet permanent, solidarizat de corpul lagărului. Amplitudinea admisibilă a vibrației lagărele este reglementată prin STAS 6910/74. Valoarea maximiă admisibilă este 25 μm și cu supraveghere 34 μm.

Vibrația arborelui (absolută sau relativă) poate fi măsurată printr-un traductor aflat în contact direct cu arborele. Sistemul acesta de măsură poate lucra însă numai pînă la o limită inferioară de frecvență de 12 Hz și necesită o ungere permanentă. Din acest motiv se preferă măsurarea indirectă, cu traductori capacitivi sau inductivi. Sistemul de măsură capacitiv are dezavantajul posibilității de modificare a dielectricului dintre traductor și ax, prin ulei, abur sau apă. De aceea s-a răspîndit sistemul inductiv. Inductanța traductorului este o funcție a distanței de la suprafața arborelui. Prin modificarea periodică a acestei distanțe, produsă de vibrația arborelui, se obține o reprezentare a vibrației.

Scopul măsurării vibrațiilor este acela de a cunoaște și preveni modificările neadmisibile ale jocurilor radiale, în special la etanșări sau lagăre, precum și de a supraveghea solicitarea dinamică a lagărelor.

Pentru a obține mărimea reală a vibrației arborelui, este necesar să se efectueze măsurătorile pe două direcții și să se determine vibrația rezultantă [4.2]. Din fig. 4.1 se vede că amplitudinea maximă a vibrației are o direcție diferită față de direcția de măsurare, afară de un caz excepțional. În figură sînt compuse vibrațiile în direcțiile orizontală și verticală, de aceeași frecvență, însă defazate și de amplitudine maximă diferită. Considerînd deplasările reprezentate în figură localizate la centrul arborelui, se arată că acesta descrie o curbă închisă, în cazul nostru o elipsă (v. fig. 4.1). În fig. 4.2 sînt reprezentate traiectoriile centrului arborelui în cîteva cazuri ideale de vibrații. Pentru cîteva din ele, este reprezentată în fig. 4.3 curba de vibrație rezultantă. În realitate traiectoriile centrului arborelui au o formă neregulată. Determinarea și analiza lor este utilă pentru aprecierea siguranței de funcționare a turbinei. În acest scop se poate realiza un montaj, prin care traiectoria centrului arborelui să fie reprodusă cu un oscilograf. Semnalele emise de doi traductori de vibrații, amplasați pe două direcții perpendiculare, sînt amplificate, compuse electronic și înregistrate. Pentru urmărirea continuă a vibrațiilor, se pot utiliza și mărimile măsurate de cîte un singur traductor, care dau informații calitative foarte importante. În orice caz, este necesar să se facă înregistrarea mărimii vibrațiilor, pentru a se putea studia evoluția

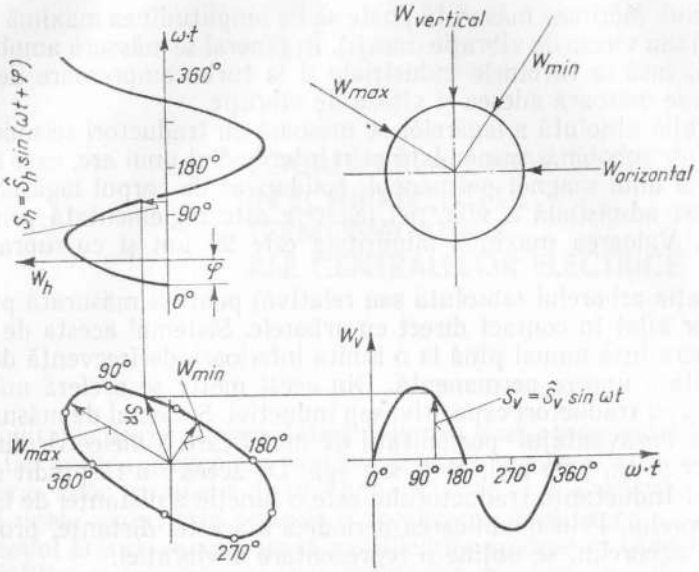


Fig. 4.1. Traiectoria centrului axului, reprezentat pentru două direcții de vibrație [4.3]:
S_v — vibrație verticală; S_h — vibrație orizontală; S_R — vibrație rezultantă; φ — unghi de fază; W — direcție de vibrație.

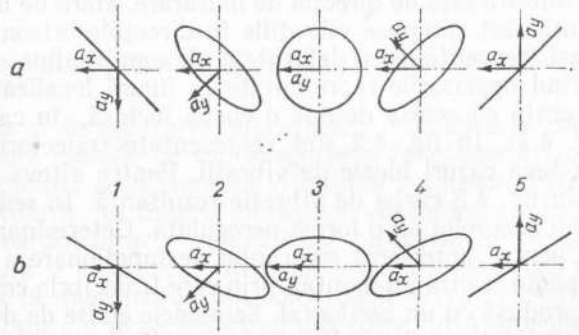


Fig. 4.2. Traiectoria centrului axului, în funcție de unghiul de fază φ pentru două frecvențe egale [4.2]:
a — amplitudini egale $a_x = a_y$; *b* — amplitudini inegale ($a_x = 2/3\ a_y$)
Unghiul de fază: $1 - \varphi = \pm 0°$; $2 - \varphi = \pm 45°$; $3 - \varphi = \pm 90°$; $4 - \varphi = \pm 135°$; $5 - \varphi = \pm 180°$.

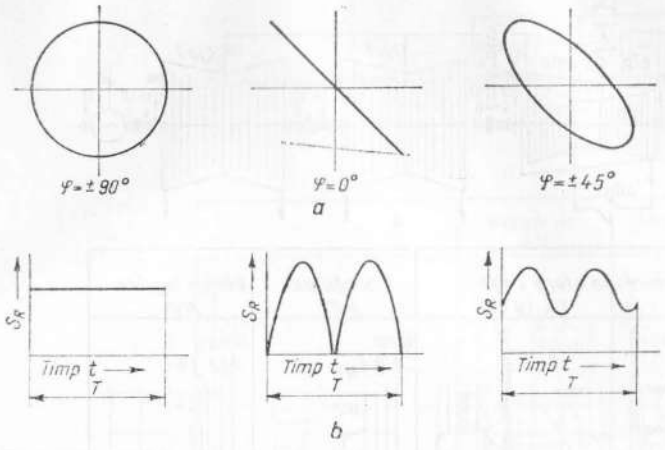


Fig. 4.3. Reprezentarea vectorului oscilației rezultante S_R în funcție de timp (două amplitudini componente egale) [4.2]:
a — traiectorii; *b* — oscilații rezultante.

stării unei mașini rotative. De o deosebită importanță este înregistrarea valorii vibrațiilor la prima punere în funcțiune sau după reparații capitale, pentru a servi ca termen de comparație la măsurători ulterioare. În orice caz, înregistrarea trebuie să fie făcută simultan pentru toate traductoarele cu aparate cu înregistrare continuă, deoarece pentru analizele cazurilor excepționale survenite este necesară existența unor valori măsurate simultan. Este util să se dispună pe cît posibil și de înregistrarea puterii turbinei, respectiv a turației în cursul proceselor de pornire și de oprire.

Aparatele de măsurat trebuie să funcționeze într-un interval de frecvențe suficient de mare, pentru cuprinderea întregului domeniu de funcționare a mașinii. La turbinele mari din centralele electrice, funcționarea cu virorul cuprinde de obicei frecvența între 0,8 și 2 Hz, perioada de încălzire 10 la 20 Hz, ridicarea turației inclusiv perioadele de rezonanță la trecerea prin turațiile critice 20—200 Hz, funcționarea cu sarcină 25—60 Hz. La turbinele industriale de turație ridicată și de putere mică, se poate renunța la cuprinderea perioadei de pornire, în schimb limita superioară a frecvenței crește. Domeniul de funcționare este astfel cuprins de-obicei între 10 și 800 sau chiar 1 000 Hz.

Au fost elaborate norme privind vibrația arborelui. Astfel de exemplu, pentru turbine cu abur cu turații de 3 000 și 3 600 min^{-1}, se prescriu valori maxime de 120 μm, la funcționarea de durată, 180 μm, pe o perioadă limitată pînă la cîteva săptămîni și 360 μm pentru o durată scurtă de cîteva ore [4.4]. Aceste valori sînt foarte mari și în practică se întîlnesc

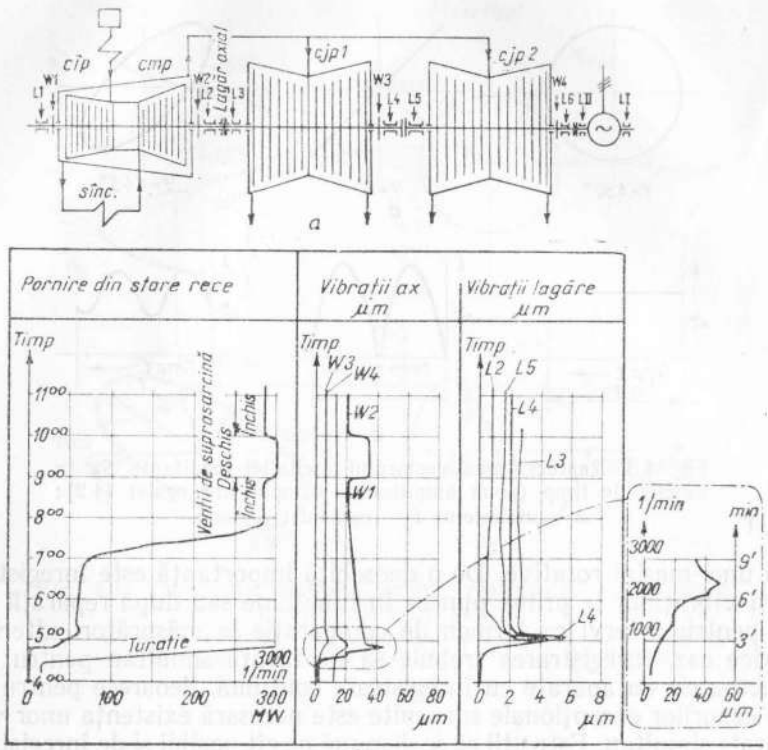


Fig. 4.4. Vibrații normale la pornirea din stare rece a unei turbine de 300 MW [4.1]:

a — turbină de 300 MW, cu punctele de măsură a vibrațiilor; *b* — diagramele de vibrații; *W* — vibrometre pe ax; *L* — vibrometre pe lagăre.

curent valori sensibil mai mici. Este însă de subliniat faptul că importantă este în primul rînd tendința de modificare a vibrațiilor și numai în al doilea rînd mărimea lor.

Pentru interpretarea și utilizarea măsurărilor de vibrații, este important ca pentru fiecare turbină să existe un catalog de înregistrări ale vibrației arborelui la diferitele faze de exploatare și anume la rotirea cu virorul, la creșterea turației, la încărcare, descărcare și oprire, pentru stare rece, caldă și fierbinte a turbinei. În cele ce urmează, sînt date cîteva exemple pentru a ilustra importanța metodei de măsurare și analiză a vibrațiilor, la evaluarea siguranței, de funcționare a turbinelor [4.1, 4.3].

Exemplul 4.1. În fig. 4.4 este prezentată o diagramă de vibrații normale pentru un bloc de 300 MW, în timpul pornirii de la rece și a încărcării. Se remarcă o creștere a

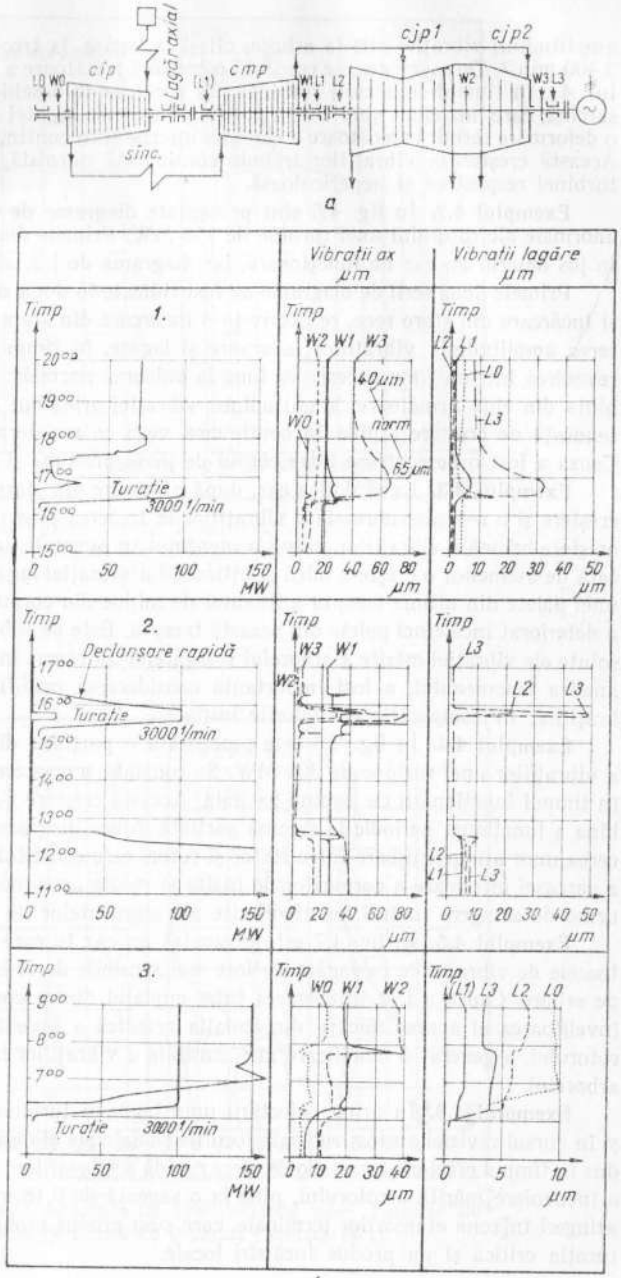


Fig. 4.5. Vibrații la pornirea din stare rece și din stare caldă a unei turbine de 150 MW [4.1]:

a — turbină de 150 MW, puncte de măsură a vibrațiilor; *W* — vibrometre pe ax; *L* — vibrometre pe lagăre; *b* — diagramele de pornire; *1* — diagramă normală de pornire din stare rece; *2* — diagramă anormală de pornire din stare fierbinte (descentrarea cuplajului cu generatorul); *3* — diagramă anormală de pornire din stare caldă (paletă ruptă în c.j.p.2).

amplitudinii vibrației atît la arbore, cît și la lagăre, la trecerea prin turația critică de 2 400 min^{-1}. De asemenea, se constată o creștere trecătoare a vibrației arborelui în punctul A_2, în timpul încărcării turbinei. Ea corespunde deschiderii unui ventil de supra-sarcină, care introduce abur într-o porțiune îngustă a treptei de reglaj. Aceasta provoacă o deformare termică trecătoare a carcasei interne și în continuare o deplasare a rotorului. Această creștere a vibrațiilor trebuie considerată normală, fiind specifică construcției turbinei respective și nepericuloasă.

Exemplul 4.2. În fig. 4.5 sînt prezentate diagrame de vibrații ridicate în situații anormale ale rotorului unei turbine de 150 MW. Primele două serii de diagrame de sus în jos descriu un caz de funcționare, iar diagrama de jos, al doilea caz de funcționare.

Primele două serii de diagrame au fost ridicate în două zile consecutive, la o pornire și încărcare din stare rece, respectiv la o încărcare din stare fierbinte. Se remarcă creșterea amplitudinii vibrațiilor la arbore și lagăre, în timpul pornirii din stare rece și revenirea într-un timp excesiv de lung la valoarea normală. La pornirea din stare fierbinte din ziua următoare, amplitudinea vibrației arborelui a crescut peste 80 μm, cu tendință de creștere rapidă în continuare, ceea ce a determinat declanșarea turbinei. Cauza a fost o descentrare între corpul de joasă presiune și generator.

Exemplul 4.3. La al doilea caz, după o pornire din stare caldă, care a comportat o creștere și o revenire normală a vibrațiilor la trecerea prin turația critică, s-a produs o creștere bruscă a vibrațiilor, care s-a menținut în punctele de măsură L_0 și L_2. Se constată de asemenea o creștere mică și întîrziată a vibrației lagărelor. Cauza a fost ruperea unei palete din ultima treaptă a fluxului de mijloc din corpul de joasă presiune. Paleta a deteriorat încă cinci palete din această treaptă. Este de subliniat faptul că valorile absolute ale vibrației mărite a arborelui și lagărelor au rămas în limitele admisibile. Pentru analiza fenomenului, a fost importantă considerarea modificării de amplitudine a vibrațiilor, în comparație cu valorile inițiale.

Exemplul 4.4. În fig. 4.6 este prezentată o porțiune dintr-o modificare evolutivă a vibrațiilor unei turbine de 300 MW. Se constată o creștere a amplitudinii vibrațiilor în timpul funcționării cu sarcină parțială. Această creștere s-a produs treptat, cînd turbina a funcționat periodic la sarcină parțială. Alura diagramei vibrațiilor indică producerea unor atingeri ușoare între stator și rotor, care constituie cauza deformării termice a carcasei interioare a corpurilor de înaltă și medie presiune. La revizie, s-au constatat urme de atingere în trei locuri diferite ale segmentelor de etanșare.

Exemplul 4.5. În fig. 4.7 este prezentat un caz în care indicațiile date de traductoarele de vibrație de pe lagăre au fost mai sensibile decît indicațiile traductoarelor de pe arbore. Cauza a fost înțepenirea între cuplajul dintre corpurile de joasă presiune și învelitoarea ei a unei bucăți din izolația acustică a învelitoarei. Cauza fiind externă rotorului, a generat o modificare mai sensibilă a vibrațiilor lagărului, decît a vibrațiilor arborelui.

Exemplul 4.6. În urma defectării unui lagăr, o turbină de 300 MW a fost oprită și în cursul reviziei au fost refăcute jocurile radiale ale etanșărilor. La repornire, s-a produs în timpul creșterii turației o creștere rapidă a vibrațiilor. La deschidere, s-a constatat o încovoiere mărită a rotorului, pînă la o săgeată de 0,18 mm. S-au constatat din nou atingeri în zona etanșărilor terminale, care s-au produs probabil în timpul trecerii peste turația critică și au produs încălziri locale.

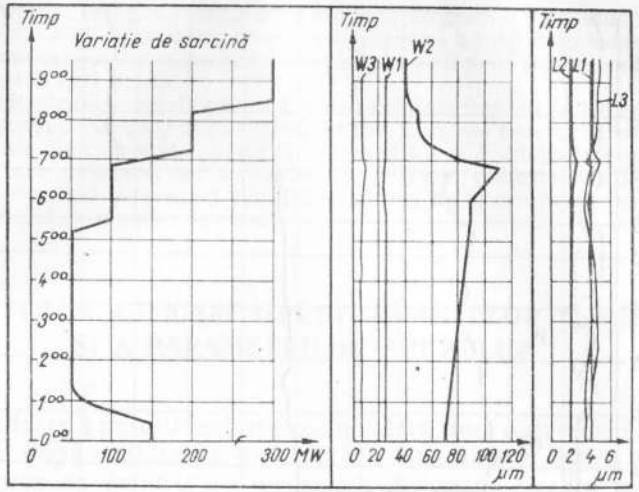


Fig. 4.6. Vibrații anormale în funcționarea unei turbine de 300 MW (ușoare atingeri ale vîrfurilor labirinților la sarcină parțială) [4.1].

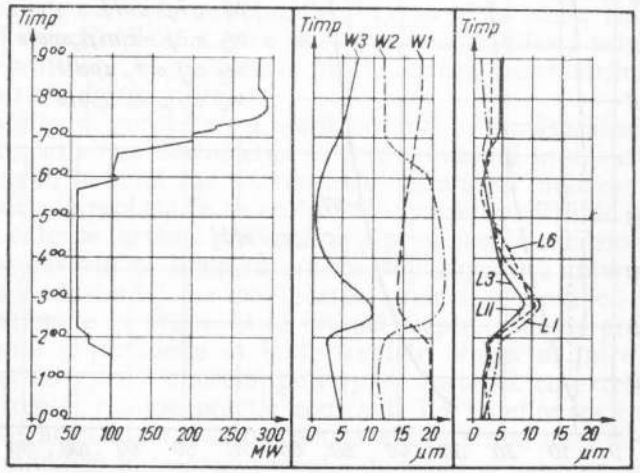


Fig. 4.7. Vibrații anormale în funcționarea unei turbine de 300 MW generate de o cauză externă [4.1].

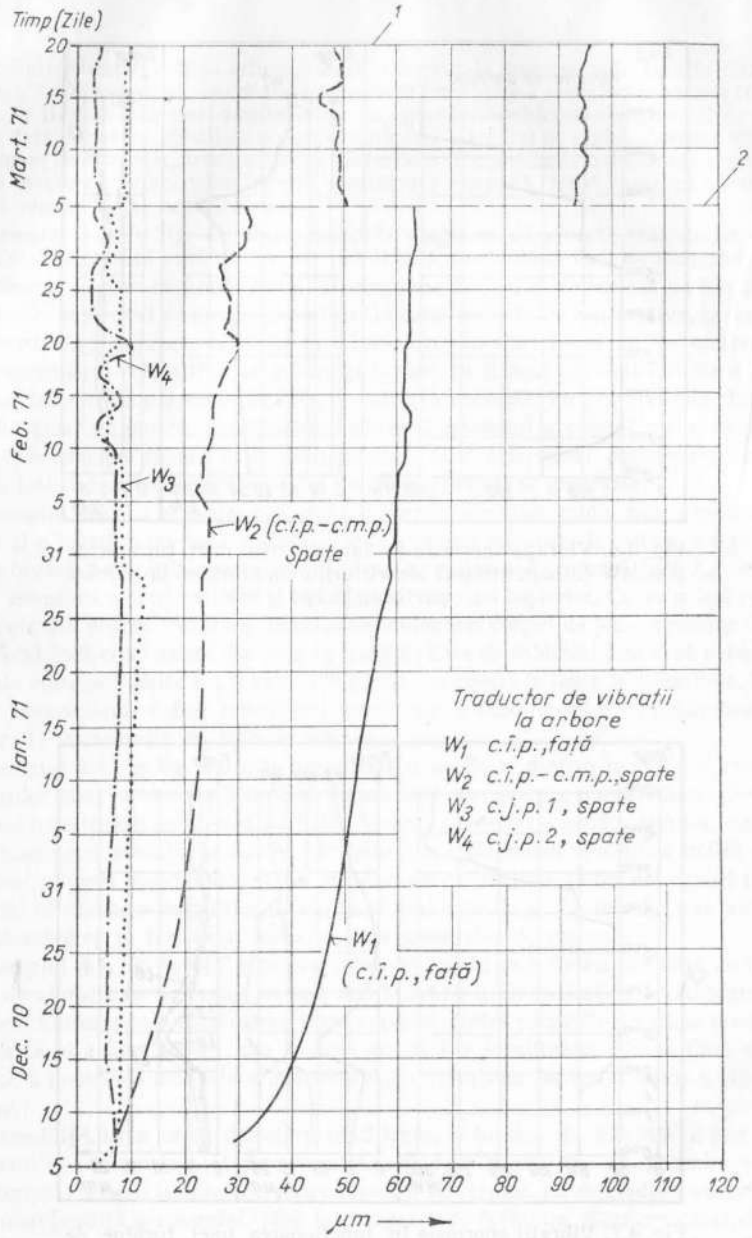


Fig. 4.8. Defecțiune indicată de creșterea amplitudinii vibrațiilor axului unei turbine [4.3]. Indicațiile traductorului de vibrații la ax:
W_1 — c.î.p. față; W_2 — c.î.p. — c.m.p., spate; W_3 — c.j.p.1, spate; W_4 —c.j.p. 2, spate; *1* — oprire planificată; 2 — rupere de palete în c.î.p.

Exemplul 4.7. În fig. 4.8 este arătată creșterea progresivă a amplitudinii vibrațiilor la blocul de 300 MW, ca urmare a încovoierii progresive a rotorului produsă de tensiuni interne. Se constată la finele perioadei înregistrate o creștere bruscă a vibrațiilor produsă de ruperea unei palete.

În fig. 4.9 este reprezentată pentru diferite sarcini ale turbinei de 300 MW traiectoria centrului arborelui, înainte și după ruperea paletei. Lungirea traiectoriei este însemnată, precum se vede din comparația dintre fig. 4.9, *a* și 4,9, *b*. Evoluția traiectoriei descrise de centrul arborelui turbinei de 300 MW în timp de 6 luni, prezentată în fig. 4.10, indică o înrăutățire continuă a nivelului vibrațiilor, cauzată de încovoierea progresivă a rotorului sub efectul tensiunilor interne.

4.2. MODIFICAREA PERFORMANȚELOR TURBINEI ȘI A PARAMETRILOR ABURULUI

O modificare a puterii turbinei sau a valorii unui parametru al aburului în turbină, după o anumită perioadă de funcționare, indică producerea unui fenomen ca deteriorare mecanică, depuneri, frecare în interiorul turbinei. Localizarea defectului și determinarea naturei sale înainte de oprire prezintă interes, atît pentru a stabili urgența opririi, cît și pentru pregătirea pieselor de schimb necesare. Analiza modificării se bazează pe comparația dintre parametrii de funcționare, măsurați la punerea în funcțiune (prima pornire sau după o reparație), cu valorile măsurate după apariția unei deviații. Analiza modificării parametrilor aburului se asociază cu analiza modificărilor intervenite în vibrația arborelui. Acestea apar de obicei la defecțiunile din rotorul turbinei. Totuși, există cazuri cînd defecțiunile mecanice în rotor nu se manifestă printr-o modificare a vibrațiilor. În asemenea cazuri, analiza parametrilor aburului poate furniza indicații utile.

Posibilitatea de constatare a stării turbinei prin măsurători comparative, în alternativă cu deschiderea ei, este prevăzută în unele prescripții [4.5]. Se impun în acest caz toleranțe de măsură cel mult egale cu toleranțele admise la probele de recepție. Principalele condiții de funcționare variabile și externe turbinei sînt sarcina și presiunea în condensator (parametrii aburului viu și temperatura de supraîncălzire intermediară se presupun a fi constante). La modificarea sarcinei, se modifică randamentul de funcționare al primei și al ultimei trepte, căderea prelucrată în prima treaptă și presiunile în toate treptele. Raportul între presiunea de intrare și de ieșire a aburului pe treptele turbinei, cu excepția primei și ultimei trepte, rămîne practic constant. La funcționare cu presiune alunecătoare, acest raport rămîne constant și la prima treaptă. Temperatura nu se modifică în treptele corpului de medie și joasă presiune (după supraîncălzirea intermediară), iar la funcționare cu presiune alunecătoare nu se modifică nici în treptele corpului de înaltă presiune.

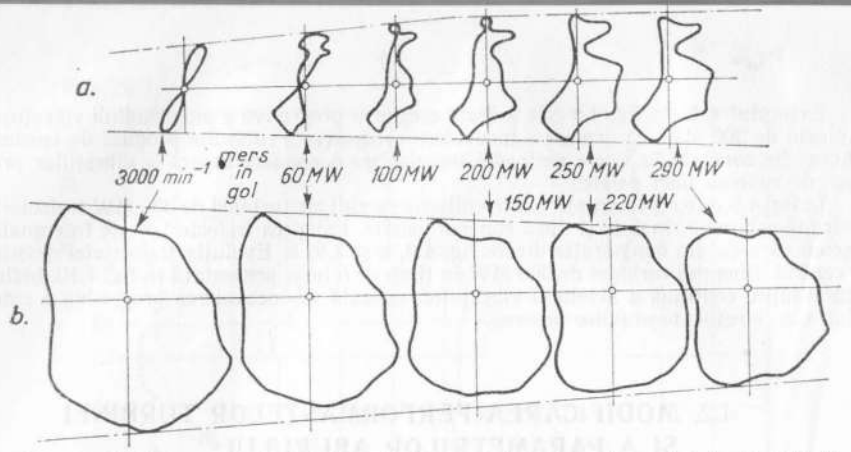


Fig. 4.9. Modificarea traiectoriei centrului axului, cu ocazia unei defecțiuni [4.3].
Traiectorii ale centrului axului c.i.p. – c.m.p., la lagărul *1*.
a — înaintea ruperii de palete; *b* — după ruperea de palete.

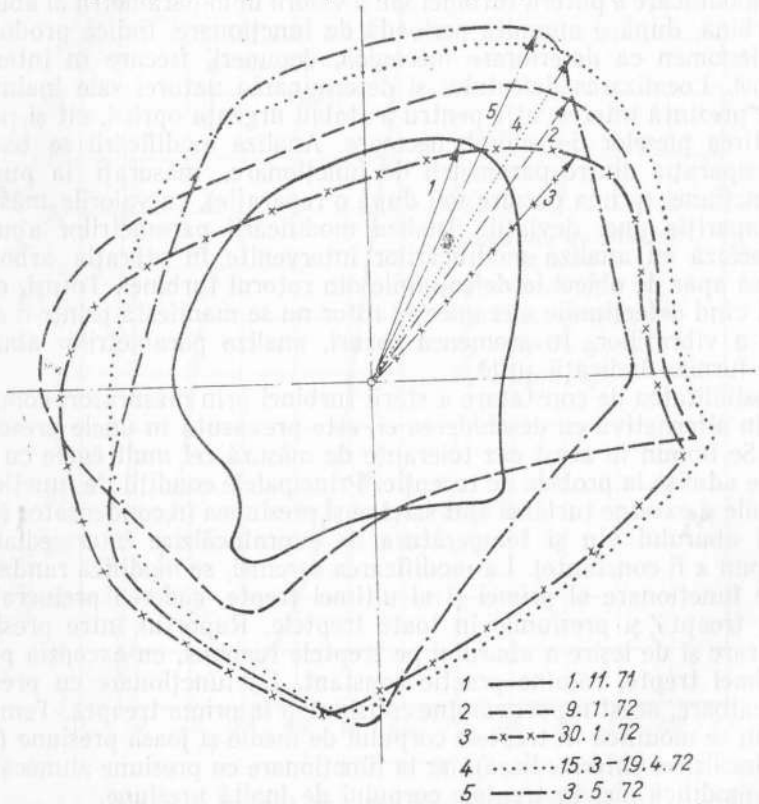


Fig. 4.10. Modificarea în timp a traiectoriei centrului axului la producerea unei defecțiuni [4.3].
Traiectoria centrului axului măsurată la o sarcină de 280 MW, la lagărul *1*.

Debitul de abur D, în toate treptele turbinei, poate fi exprimat astfel [4.6]:

$$D = 3\,600 \cdot C_q \cdot A_n \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{\varkappa}{\varkappa - 1} \cdot \frac{p_1}{v_1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\varkappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\varkappa+1}{\varkappa}}\right]}. \tag{4.1}$$

Avînd în vedere că mărimile $\frac{p_2}{p_1}$, C_q, $\varkappa$, variază puțin, ecuația (4.1) poate fi transformată în:

$$\frac{D}{\sqrt{\frac{p_1}{v_1}}} = \text{const}; \tag{4.2}$$

$$\frac{D}{p_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1 T_1}}} = \text{const}, \tag{4.3}$$

în care: C_q este un coeficient de curgere; A_n — secțiunea de ieșire a ajutajelor; $\varkappa$ — coeficientul adiabatic; p_1 — presiunea de intrare în treaptă; p_2 — presiunea statică între rîndurile de palete fixe și mobile; R_1 — constanta gazului; v_1 — volumul specific al aburului la intrarea în treaptă; T_1 — temperatura absolută a aburului la intrarea în treaptă.

Ecuațiile (4.1), (4.2), (4.3) sînt valabile și pentru prima treaptă, la o poziție fixă a ventilelor de reglaj.

Relația între debit și presiune este prezentată în fig. 4.11. Toate treptele de după supraîncălzirea intermediară, cu excepția ultimei trepte, au o caracteristică presiune-debit lineară [4.6]. Temperatura în trepte fiind constantă, ecuația de stare a aburului este $p \cdot v = \text{const}$ și, utilizînd ecuația (4.2), rezultă $D \cdot v = \text{const}$, adică debitul volumetric în treptele de după supraîncălzirea intermediară este constant. De aici rezultă că practic nu se modifică nici triunghiurile de viteză în palete și că deci randamentul intern al acestor trepte rămîne constant, la orice sarcină pe turbină. Aceste considerații sînt valabile și pentru treptele din corpul de înaltă presiune, în cazul funcționării cu presiune alunecătoare, cu excepția treptei de reglaj. La funcționarea cu presiune inițial fixă, temperatura în aceste trepte scade odată cu scăderea sarcinei. Conform ecuației (4.3), la scăderea temperaturei rezultă că și presiunea necesară pentru trecerea debitului redus scade mai mult decît proporțional cu debitul. Din acest motiv, caracteristica presiune-debit deviază spre valori mai mici, față de forma lineară.

Pentru ultima treaptă, caracteristica este lineară în domeniul superior al sarcinilor, deoarece această treaptă este proiectată pentru un raport de presiuni apropiat de raportul critic (fig. 4.12). La sarcini parțiale mici,

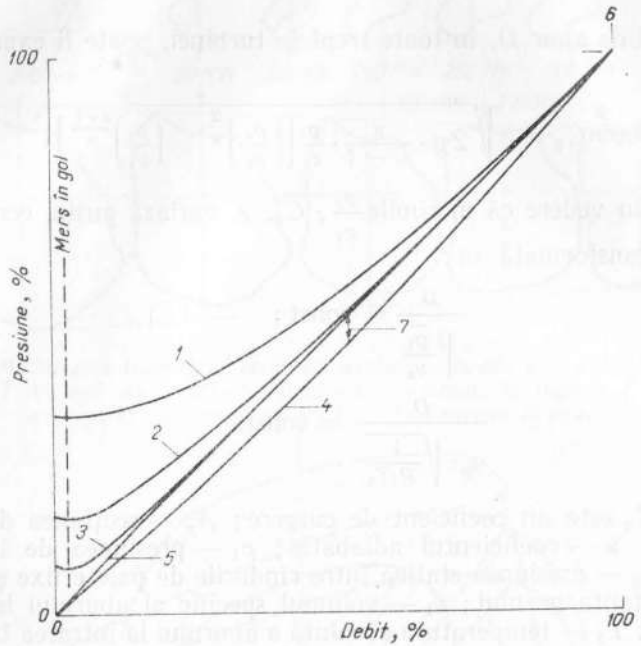


Fig. 4.11. Funcţia debit-presiune [4.6]:

1, 2, 3 — presiune de intrare în ultima treaptă la presiune absolută de evacuare de respectiv 50 mm, 25 mm, 13 mm Hg; *4* — presiune treapta întîia; *5* — presiune la treptele după supraîncălzirea intermediară; *6* — presiune nominală la debit nominal; *7* — deviaţie de 3 — 5%, de la o linie dreaptă. (750 mm Hg = 1 bar.)

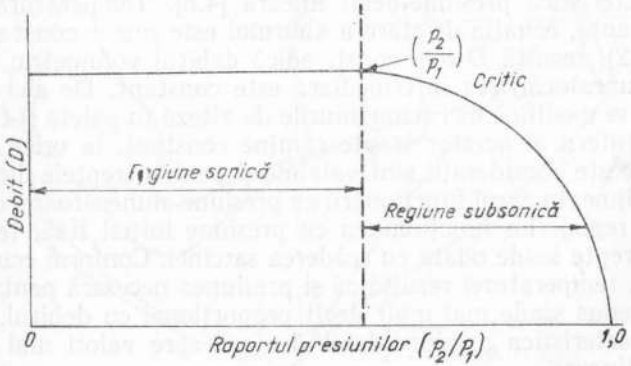


Fig. 4.12. Debitul de abur prin ultima treaptă a unei turbine cu condensaţie în funcţie de raportul presiunilor [4.6].
Ipoteze: presiune de intrare constantă, temperatură de intrare constantă.

presiunea de intrare în treaptă scade, raportul presiunilor creşte şi caracteristica deviază de la forma lineară. La creşterea presiunii în condensator, deci a presiunii de ieşire din ultima treaptă, raportul presiunilor creşte şi caracteristica treptei se depărtează şi mai mult de o linie dreaptă. Presiunea de intrare la debit nul este egală cu presiunea din condensator, iar la debitul de funcţionare în gol este ceva mai mică, datorită efectului de ventilaţie al ultimei trepte.

La sarcină parţială şi presiune iniţială constantă, presiunea după treapta de reglaj scade. Raportul presiunilor scade sub valoarea critică, astfel că debitul printr-o secţiune dată rămîne constant. Dacă dintr-un motiv oarecare, de exemplu prin eroziune, suprafaţa de trecere prin ajutaje creşte în urma deteriorării, debitul de abur care trece este proporţional cu suprafaţa mărită. La sarcini apropiate de sarcina nominală, debitul creşte mai puţin decît proporţional cu suprafaţa de trecere, deoarece raportul presiunilor devine mai mic decît valoarea critică (fig. 4.13). Prin urmare deteriorarea ajutajelor primei trepte poate fi detectată mai uşor prin constatarea creşterii debitului la sarcini parţiale.

Pentru ca din comparaţia valorilor modificate ale parametrilor de funcţionare să se poată trage concluzii utile asupra unor eventuale defec-

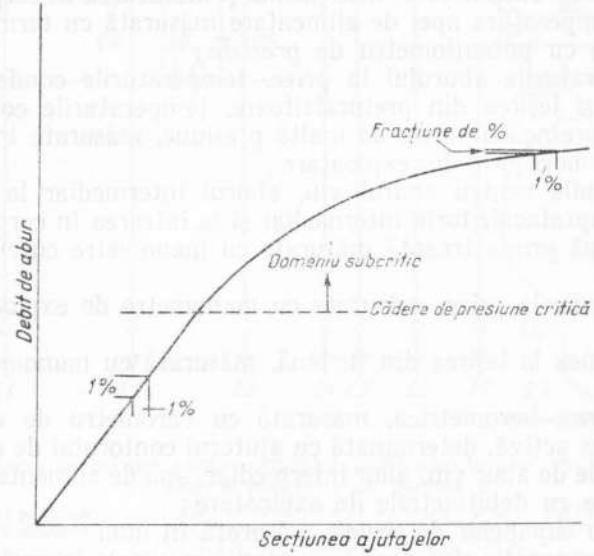


Fig. 4.13. Debit de abur în funcţie de secţiunea ajutajelor primei trepte [4.6].
Ipoteze: presiune de intrare constantă, temperatură de intrare constantă.

țiuni, este necesar să existe date de referință, iar datele măsurate ulterior să fie corectate, pentru a corespunde condițiilor inițiale de funcționare. Corecția trebuie făcută în funcție de presiune și temperatura aburului de admisie și de temperatura de supraîncălzire :

$$p_c = p_0 \sqrt{\frac{p_d}{p_t} \cdot \frac{v_t}{v_d} \cdot \frac{v_{dr}}{v_{tr}}}, \qquad (4.4)$$

în care :

p_c este presiunea corectată ; p_d — presiune nominală la ventilele de reglaj ; p_0 — presiunea măsurată ; p_t — presiunea măsurată la ventilele de reglaj ; v_d — volumul specific nominal la ventilele de reglaj ; v_t — volumul specific măsurat la ventilele de reglaj ; v_{tr} — volumul specific la temperatura și presiunea măsurată la intrarea în corpul de medie presiune ; v_{dr} — volumul specific la valorile nominale ale temperaturii și presiunii la intrarea în corpul de medie presiune.

Măsurarea parametrilor comparați trebuie făcută cu o precizie bună, deoarece erori de măsură pot falsifica concluziile. Valorile de comparație necesare sînt arătate mai jos, în conformitate cu [4.6] :

— temperaturile pentru aburul viu, aburul intermediar la intrarea și ieșirea din supraîncălzitorul intermediar și la intrarea în corpul de joasă presiune, temperatura apei de alimentare măsurată cu termocuple etalonate, citite cu potențiometru de precizie ;

— temperaturile aburului la prize, temperaturile condensatului la intrarea în și ieșirea din preîncălzitoare, temperaturile condensatului secundar la preîncălzitoarele de înaltă presiune, măsurate în funcție de dotare cu termocuplele din exploatare ;

— presiunile pentru aburul viu, aburul intermediar la intrarea și ieșirea din supraîncălzitorul intermediar și la intrarea în corpul de joasă presiune, după prima treaptă măsurate cu manometre cu clasă de precizie 0,1 ;

— presiunile la prize, măsurate cu manometre de exploatare etalonate ;

— presiunea la ieșirea din turbină, măsurată cu manometru de exploatare ;

— presiunea barometrică, măsurată cu barometru de exploatare ;

— puterea activă, determinată cu ajutorul contorului de exploatare ;

— debitele de abur viu, abur intermediar, apă de alimentare, condensat, măsurate cu debitmetrele de exploatare ;

— poziția supapelor de reglaj, măsurată în mm.

Pentru comparație sînt necesare valorile măsurate la poziție deschisă a supapelor de reglaj și parametrii nominali ai turbinei.

Punctele de măsură utilizate la un alt caz de urmărire prin măsurări, la un grup de 72 MW, sînt indicate în fig. 4.14 [4.7]. Se remarcă măsura-

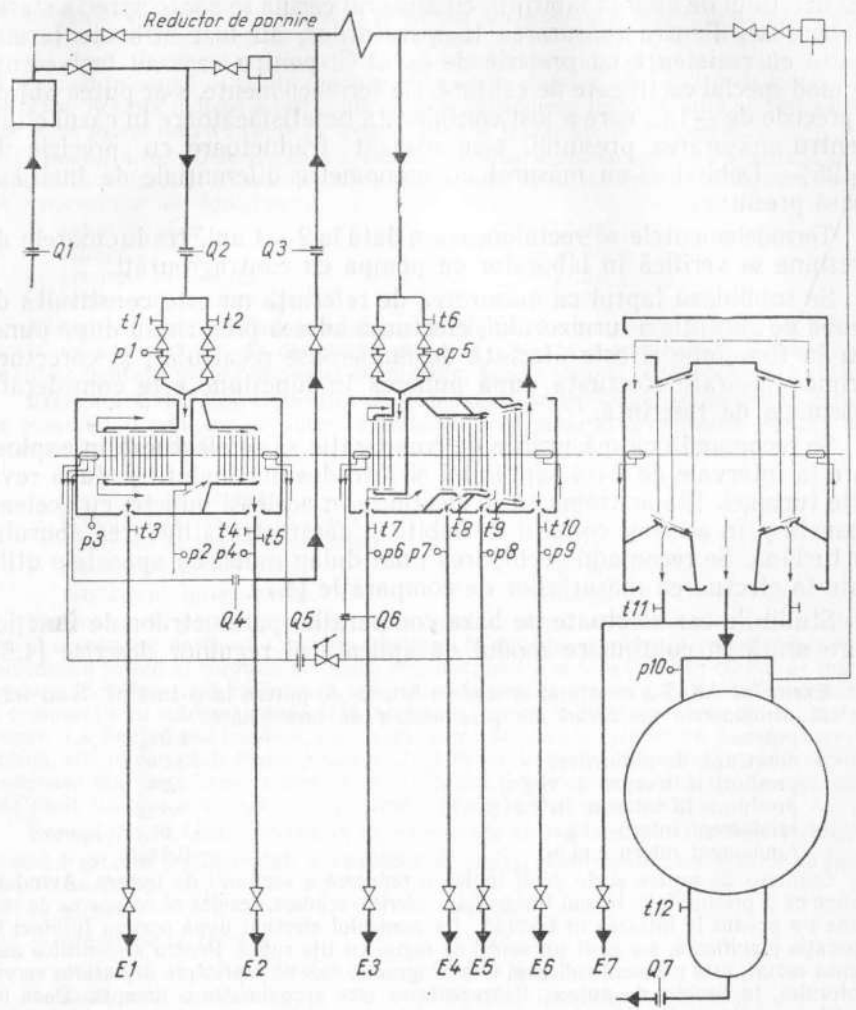


Fig. 4.14. Schema de măsură pentru controlul stării unei turbine [4.7]. Amplasarea și notarea punctelor de măsură :

Temperaturi : c.î.p. intrare stînga (t_1) ; c.î.p. intrare dreapta (t_2) ; priza 1 (t_3) ; c.î.p. ieșire stînga (t_4) ; c.î.p. ieșire dreapta (t_5) ; c.m.p. intrare (t_6) ; priza 3 (t_7) ; priza 4 (t_8) ; priza 5 (t_9) ; priza 6 (t_{10}) ; priza 7 (t_{11}) ; colector condensat (t_{12}).

Presiuni : c.î.p. intrare (p_1) ; camera treptei (p_2) ; întoarcere c.î.p. (p_3) ; ieșire c.î.p. (p_4) ; intrare c.m.p. (p_5) ; priza 3 (p_6) ; priza 4 (p_7) ; priza 5 (p_8) priza 6 (p_9) ; condensator (p_{10}).

Debite : apă de alimentare (Q_1) ; abur viu (Q_2) ; abur intermediar (Q_3) ; abur labirinți c.î.p. 1 față (Q_4) ; abur labirinți c.î.p 1 mijloc — c.î.p. 2 față (Q_5) ; abur labirinți c m.p. 1 față (Q_6) ; condensat (Q_7).

rea debitului de abur la labirinți, cu ajutorul căruia se poate aprecia starea labirinților. Pentru măsurarea temperaturilor, au fost utilizate termometre cu rezistență cu precizie de ± 0,1°C, pentru care au fost cerute în mod special certificate de calitate. Cu termoelemente, s-ar putea obține o precizie de ±1°C, care a fost considerată nesatisfăcătoare în cazul citat. Pentru măsurarea presiunii, s-au utilizat traductoare cu precizie de 0,125%. Debitele s-au măsurat cu manometre diferențiale de înaltă și joasă presiune.

Termoelementele se reetalonează o dată la 2—3 ani, traductoarele de presiune se verifică în laborator cu pompa cu contragreutăți.

Se subliniază faptul că măsurarea de referință nu este constituită de proba de garanție a furnizorului, efectuată adesea prea tîrziu după punerea în funcțiune și este afectată de numeroase recalculări și corecturi. Prima măsurare efectuată după punerea în funcțiune este considerată măsurare de referință.

Se recomandă că măsurările de comparație să se efectueze în exploatare la intervale de 2—6 săptămîni și întotdeauna înainte și după reviziile turbinei. Ele ar trebui să se efectueze în aceleași puncte, cu aceleași aparate și în aceleași condiții de debite și parametri la intrarea aburului în turbină. Se recomandă echiparea unui dulap mobil cu aparatele utilizate la efectuarea măsurărilor de comparație [4.7].

Studii de caz efectuate pe baza comparației parametrilor de funcționare arată în continuare modul de aplicare al regulilor descrise [4.6].

Exemplul 4.8. S-a constatat o scădere bruscă de putere la o turbină. S-au înregistrat următoarele modificări ale parametrilor de funcționare:

— putere	−4,9% ;
— debit apă de alimentare	−3,6% ;
— presiune la treapta de reglaj	−4,2% ;
— presiunea la intrarea în c.m.p.	−4,4% ;
— randament intern c.î.p.	−1,8% ;
— randament intern c.m.p.	−0,4%.

Scăderea de putere și de debit indică o reducere a secțiunii de trecere. Avînd în vedere că și presiunile în lungul turbinei au suferit o scădere, rezultă că reducerea de secțiune s-a produs la intrarea în turbină. La controlul efectuat după oprirea turbinei în reparație planificată, s-a găsit un ventil de reglaj cu tija ruptă. Pentru a identifica asemenea cazuri, este necesară ridicarea unei diagrame, care să reprezinte deplasarea servomotorului, în funcție de putere. Reprezentarea este aproximativ o dreaptă. Dacă un ventil de reglaj nu funcționează, apare la probă o modificare bruscă în panta dreptei.

Exemplul 4.9. O scădere a randamentului intern al corpului de medie presiune a unei turbine a provocat efectuarea unor măsurători, din care au rezultat următoarele modificări de parametrii:

— putere	−2,0% ;
— presiune la treaptă	+0,3% ;
— presiune la intrarea în c.m.p.	+6,3% ;
— randament intern c.î.p.	−1,3% ;
— randament intern c.m.p.	−6,9%.

Creșterea de presiune la intrare și reducerea randamentului în corpul de medie presiune au indicat o reducere de secțiune și o modificare a vitezelor, datorită fie depunerilor de săruri, fie ruperii unor palete. Absența unor indicii privind formarea chiar redusă de depuneri în corpul de înaltă presiune a condus la alegerea celei de a doua ipoteze de defectare. Această ipoteză a fost confirmată la deschiderea turbinei, cînd au fost găsite o serie de palete rotorice rupte în treapta a 9-a și înțepenite în diafragmă.

Exemplul 4.10. Defecțiunea s-a manifestat prin scăderea continuă a puterii unei turbine. După 22 luni de manifestare a fenomenului, s-au măsurat următoarele variații ale parametrilor de funcționare:

— debit de abur	−17,2% ;
— putere	−16,5% ;
— presiune la treaptă	+21,2% ;
— randament intern c.î.p.	−12,2%.

Mărimile măsurate indică o reducere a secțiunii de trecere, care ar fi putut fi provocată de depuneri sau de deteriorări mecanice. Durata și continuitatea reducerii au constituit indicații asupra prezenței depunerilor, fapt confirmat la deschiderea turbinei.

Exemplul 4.11. După repornirea unui bloc oprit pentru schimbări de țevi în cazan, s-a constatat o reducere de putere a turbinei. S-au măsurat următoarele variații ale parametrilor de funcționare:

— puterea	−9,1% ;
— presiunea la treaptă	+2,1% ;
— presiunea la intrare în c.m.p.	−3,3% ;
— presiunea la ieșirea din c.m.p.	−9,7% ;
— randament intern c.î.p.	−8,9% ;
— randament intern c.m.p.	−1,4%.

Reducerea de putere și reducerea de presiune după supraîncălzirea intermediară indică o reducere de debit. Creșterea presiunii la treaptă, combinată cu reducerea randamentului intern al corpului de înaltă presiune, indică o defecțiune în corpul de înaltă presiune. Scăderea mai accentuată a presiunii la ieșirea din corpul de medie presiune, în comparație cu scăderea presiunii la intrarea în acesta, indică o reducere de secțiune de trecere. La deschiderea turbinei, s-au găsit palete deformate prin lovire de către corpuri străine, atît în corpul de înaltă presiune cît și în cel de medie presiune. Corpurile străine proveneau din timpul reparațiilor făcute în cazan. La intrarea în turbină, nu erau montate decît site grosiere, care nu au reținut corpurile străine respective.

Exemplul 4.12. Într-o perioadă de exploatare de trei ani, puterea unei turbine a crescut treptat la o poziție dată a ventilelor de reglaj. Modificările parametrilor de funcționare au fost:

— putere	+11,0% ;
— presiunea la treaptă	+11,0% ;
— presiunea la intrare în c.m.p.	+10,2% ;
— randament intern c.î.p.	− 1,8% (la putere nominală) ;
— randament intern c.î.p.	−5,9% (la putere parțială).

Creșterea de putere și creșterea presiunilor în turbină, la o poziție dată a ventilelor de reglaj, indică un debit mărit, ca urmare a creșterii secțiunii de trecere. Secțiunea mărită se află la intrarea în turbină, presiunea fiind mărită încă de la treaptă. Este de presupus o defectare a coroanei de ajutaje, cu mărire de secțiune. Faptul că la sarcină redusă scăderea randamentului intern este mai accentuată, confirmă ipoteza avarierii primei trepte, care se încarcă procentual mai mult la sarcini parțiale. La controlul efectuat la revizie, s-au confirmat supozițiile făcute.

4.3. MODIFICAREA PROPRIETĂȚILOR MATERIALULUI

În conductele supuse la eforturi la temperatură ridicată, au loc în timpul exploatării modificări în compoziția fazelor și în morfologia constituenților metalografici, care duc la scăderea capacității de rezistență a materialului.

Atît, în timpul, cît și după terminarea perioadei normate de funcționare, este necesar să se determine prin încercări proprietățile oțelului, pentru stabilirea duratei restante de funcționare. Concluzia analizei poate să fie continuarea funcționării la parametri normali sau la parametri scăzuți sau chiar înlocuirea materialului, adică înlocuirea echipamentului respectiv.

Aprecierea se bazează pe următoarele analize [4.8] :

— analiza microstructurii metalului, respectiv a stadiului de evoluție a modificărilor ;

— determinarea caracteristicilor de rezistență : rezistență de rupere, limită de curgere, plasticitate și tenacitate, la + 20°C și la temperaturi din domeniul temperaturii de lucru, prin încercări de scurtă durată ;

— determinarea caracteristicilor de fluaj (limită de rupere de durată, limită de alungire de durată), la temperatura de lucru, prin încercări de durată și extrapolare prin formule parametrice (de ex. Larson-Miller).

În afară de probele menționate, se mai folosesc și următoarele determinări [4.9] :

— determinarea prin calcul a gradului relativ de epuizare a duratei de funcționare ;

— măsurarea deformației remanente de fluaj ;

— determinarea de duritate [4.10, 4.11] ;

— determinări de densitate [4.12].

Microstructura indică o deteriorare a materialului, în general prin disocierea de grăunți, care inițial au fost bine conturați, prin globulizarea carburilor eutectoide, prin precipitarea de carburi în soluția solidă și pe rosturile grăunților de ferită.

Exemplul 4.13. În fig. 4.15 (*a*, *b*, *c*, *d*) este prezentată evoluția microstructurii unui oțel după circa 100 000 h de funcționare.

În fig. 4.15, *a* și *b*, este prezentată microstructura oțelului în stare neutilizată. Ea este formată din ferită (circa 85%), perlită și o cantitate mică de bainită. În fig. 4.15, *c* și *d*, este prezentată microstructura aceluiași oțel, după circa 100 000 h de utilizare. Distribuția perlitei și bainitei sînt modificate, în măsură importantă. Au apărut numeroase particule de carburi, distribuite neuniform și grăunți mici de constituienți eutectoidici. Carburile eutectoide sînt globulizate, iar în soluția solidă au apărut aglomerări de carburi, provenite din disocierea parțială a cutectoidului. Se constată un grad avansat de deteriorare a microstructurii oțelului.

În unele cazuri de scădere a proprietăților materialului, analiza metalografică poate să nu furnizeze indicații concludente [4.9].

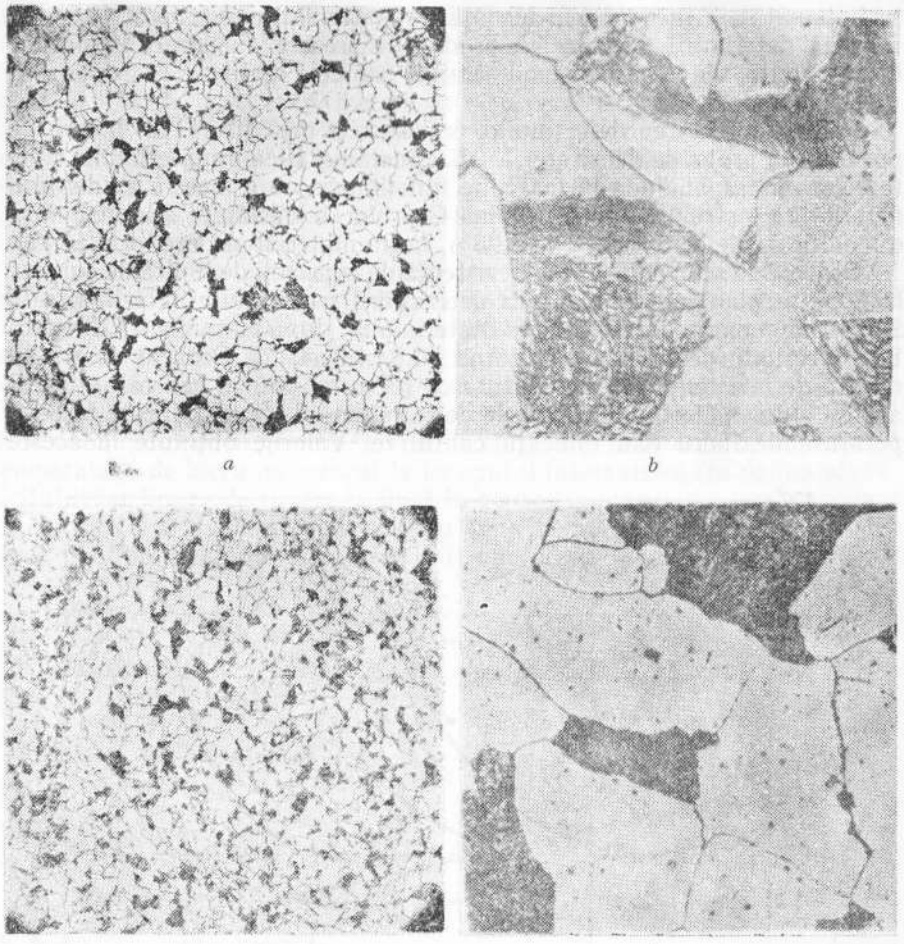


Fig. 4.15. Microstructura oțelului dintr-o conductă, atac nital 2% [4.8] :
Stare neutilizată : *a*) × 100 ; *b*) × 1 000 ; *Stare utilizată :* circa 100 000 h ; *c*) × 100 ; *d*) × 1 000.

În timpul exploatării oțelurilor aliate, se produce o separare de carburi de molibden. Concentrația de molibden în carburile separate poate da indicații asupra stadiului de obosire a materialului [4.12].

Pentru aprecierea materialului, se pot efectua probe mecanice, pe epruvete din material regenerat prin tratament termic. Dacă în material nu s-au produs defecțiuni de structură ireversibilă, valorile de rezistență

se îmbunătățesc în mod sensibil față de materialul neregenerat [4.9]. În material deteriorat, chiar dacă se produce o oarecare ameliorare a valorilor de rezistență, ele rămîn în mod sensibil sub cele realizate pe probe din material nedeteriorat.

Pentru detectarea defecțiunilor ireversibile prin fisuri sau goluri, se pot efectua probe de densitate. Analiza metalografică a materialului unei țevi care a crăpat după 38 000 h de funcționare nu a scos în evidență o deteriorare a structurii materialului. O probă de densitate a indicat însă o modificare de 0,75% față de 0,03%, la un material nedeteriorat [4.12].

Probele de scurtă durată de rezistență de rupere și de limită de curgere la 20°C nu dau indicații asupra deteriorării materialului. Rezilienta la 20°C scade odată cu deteriorarea materialului, după cum rezultă din probele efectuate de diverși cercetători [4.8, 4.9, 4.12]. Probele de scurtă durată de rezistență la temperatura de lucru nu dau în general indicații asupra stării materialului. Probele de rezistență de scurtă durată la temperatura de lucru dau indicații calitative. Valorile obținute la aceste

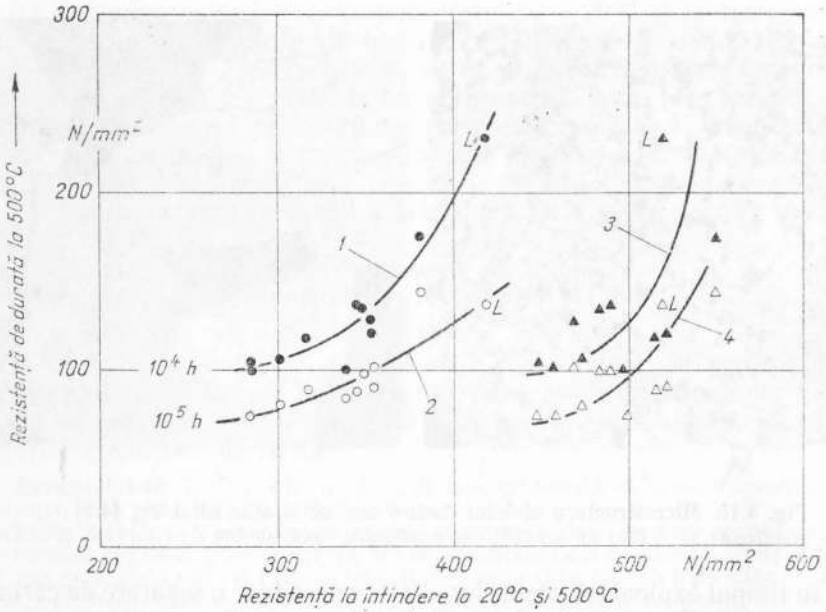


Fig. 4.16. Corelația între rezistența la întindere și rezistența de durată, după solicitare în exploatare pentru oțelul 13 CrMo 44 [4.12]:
1 — rezistență de durată la 500°C după 10^4 h, rezistență de rupere la 500°C; *2* — rezistență de durată la 500°C după 10^5 h, rezistență de rupere la 500°C; *3* — rezistență de durată la 500°C după 10^4 h, rezistență de rupere la 20°C; *4* — rezistență de durată la 500°C după 10^5 h, rezistență de rupere la 20°C; *L* — în stare de livrare.

probe nu pot fi însă valorificate cantitativ. Totuși, au fost făcute încercări de a găsi o corelație între rezultatele probelor de scurtă durată și cele ale probelor de fluaj. Astfel, pentru oțel 13 CrMo 44, s-a găsit o corespondență destul de bună între rezistența la rupere la 500°C și rezistența la fluaj la 500°C (fig. 4.16) și între timpul de rupere al unor probe încercate la 550°C și 118 N/mm² și rezistență la fluaj la 500°C (fig. 4.17). Nu s-a putut stabili o asemenea corespondență pentru valorile limitei de curgere, la temperatura ambiantă și temperatura de 500°C și rezistența la fluaj la această temperatură [4.12].

Din probele efectuate asupra unui oțel austenitic, nu rezultă existența unei corelații între valorile de rezistență de scurtă durată și valorile de rezistență de lungă durată. Evoluția în timp a valorilor de rezistență, atît de scurtă, cît și de lungă durată, a fost determinată prin încercări succesive, efectuate la intervale de timp intermediare, asupra unor epruvete supuse la solicitare în condiții de temperatură ridicată, pe o durată de 50—60 mii ore. În general, limita de curgere și rezistența de rupere la temperatura de lucru au crescut la începutul intervalului (în dauna plasticității) iar limita de rupere la fluaj în general a scăzut. La unele probe, s-a constatat o scădere însemnată în timp a raportului între limita de rupere la fluaj și limita de curgere la temperatura de lucru [4.13].

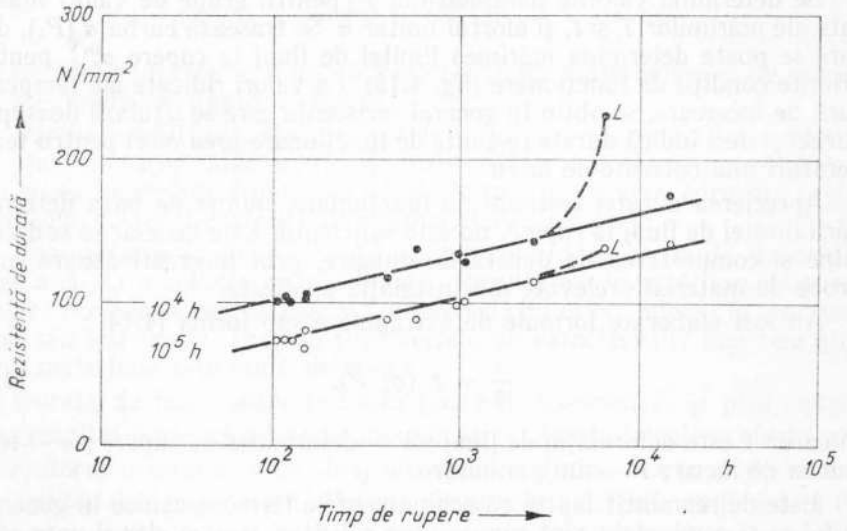


Fig. 4.17. Corelația dintre timpul de rupere la o încercare de durată la 550°C și 118 N/mm² și rezistența de durată la 500°C, după solicitare în exploatare, pentru oțel 13 CrMo 44 [4.12]:
L — în stare de livrare (valori medii).

Determinarea duratei restante de funcționare este posibilă numi cu probe de durată [4.12]. După unii cercetători, determinarea limitei de fluaj la întindere în probe de lungă durată este cea mai concludentă [4.9].

Avînd în vedere că durata restantă de funcționare depinde foarte mult de efortul unitar, probele trebuie organizate astfel ca rezistența la fluaj să poată fi indicată cu suficientă precizie, pentru temperatura și efortul unitar din exploatare. Din acest motiv, temperaturile de încercare ar trebui să fie cît mai apropiate de temperatura de funcționare. Totuși, din cauza duratei mari de probă care ar fi necesară, se efectuează încercări și la temperaturi mai ridicate. În general sînt suficiente probe la două temperaturi, care încadrează temperatura de lucru, cu durate de 10 000 h, pentru a se putea deduce cu o suficientă precizie rezistența la temperatura de lucru la o durată de 100 000 h. Pentru extrapolarea duratei, se folosesc relații parametrice, de obicei relația Larson-Miller :

$$P_1 = T\ (\lg\ t_r + C), \tag{4.5}$$

în care : P_1 este parametrul ecuației ; T — temperatura ; t_r — durata pînă la rupere ; C — o constantă care depinde de material.

Parametrul P_1 variază de obicei între $15 \cdot 10^3$ și $25 \cdot 10^3$, iar pentru oțeluri constanta C are valori în jur de 20.

Se determină valorile parametrului P_1 pentru grupe de valori măsurate ale mărimilor T și t_r și efortul unitar σ. Se trasează curba $\sigma\ (P_1)$, din care se poate determina mărimea limitei de fluaj la rupere $\sigma^{9}_{r,t}$ pentru diferite condiții de funcționare (fig. 4.18). La valori ridicate ale temperaturii de încercare, se obțin în general rezistențe care se situiază deasupra curbei și deci indică durate restante de funcționare prea mari pentru temperaturi mai coborîte de lucru.

Aprecierea duratei restante de funcționare, numai pe baza determinării limitei de fluaj la rupere, nu este suficientă. Este necesar să se determine și comportarea de durată la alungire, prin încercări asupra unei probe de material prelevate din instalația analizată.

Au fost elaborate formule de extrapolare sub forma [4.14] :

$$\frac{\varepsilon}{\delta} = f\ (\sigma,\ P), \tag{4.6}$$

în care : ε este deformația de fluaj ; δ — deformația de rupere ; σ —tensiunea de lucru ; P — un parametru.

Este de reamintit faptul că echipamentele termomecanice în general, la fel ca și conductele, sînt supuse unor solicitări statice, dar și unor solicitări ciclice, al căror efect de obosire trebuie luat în considerare. Pe baza experimentărilor, care se fac asupra comportării materialelor la solicitare ciclică, în condiții de fluaj, au fost elaborate relații pentru numărul critic

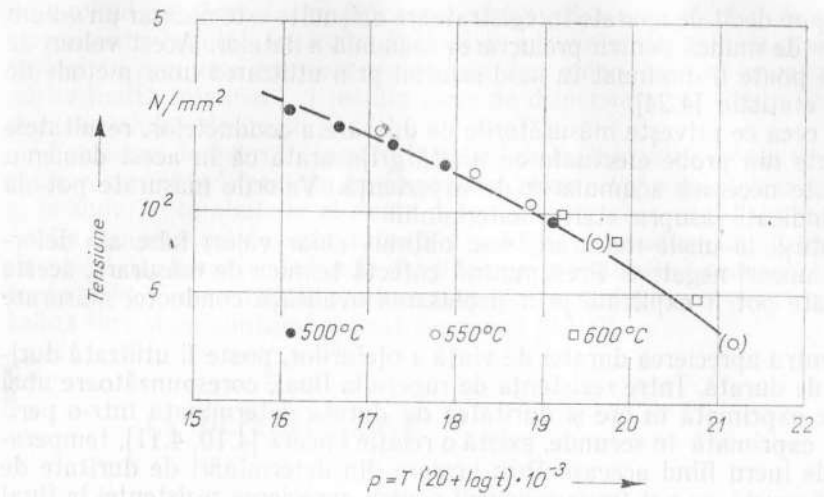


Fig. 4.18. Reprezentare Larson-Miller a punctelor de rupere în timpul probelor de durată asupra unui element din oțel 13 CrMo 44, solicitat anterior în exploatare [4.12] :
Solicitare de exploatare : 520°C, 116 000 h, 114 bar.

de cicluri în funcție de timp, de caracteristicile materialului și de durata de menținere constantă a sarcinii.

Părțile constitutive ale unei instalații pot să provină din șarje diferite de oțel, ale căror caracteristici de rezistență și structurale pot să difere. De aceea încercările trebuie să fie efectuate asupra unor epruvete prelevate din părțile instalației corespunzînd fiecărei șarje.

Comportarea la fluaj este determinată de modificările de structură, care apar la o solicitare îndelungată. Rezultatele încercărilor efectuate asupra probelor longitudinale și transversale nu diferă adesea în mod sensibil sau sistematic. Probele transversale au caracteristici mai rele abia cînd materialul este mult deteriorat.

Durata de funcționare restantă poate fi determinată și prin calcul, însă rezultatul are numai o valoare indicativă. Aceste calcule se efectuează cu ajutorul diagramelor de fluaj ale oțelului, ținînd seama și de efectul depășirilor de temperatură. Metoda presupune existența unui sistem de măsură exactă a temperaturii și presiunii și necesită o însumare a duratelor de funcționare la aceiași parametri.

Înregistrarea datelor se poate face pe benzi perforate iar prelucrarea lor se face cu ajutorul mașinilor electronice de calcul. În instalațiile care

nu dispun decît de aparate înregistratoare obișnuite este necesar un volum excesiv de muncă pentru prelucrarea manuală a datelor. Acest volum de muncă poate fi diminuat în mod sensibil prin utilizarea unor metode de calcul statistic [4.24].

În ceea ce privește măsurătorile de dilatare a conductelor, rezultatele obținute din probe efectuate cu multă grijă arată că în acest domeniu mai este necesară acumularea de experiență. Valorile măsurate pot da însă indicații asupra stării materialului.

Totuși, la unele măsurări, s-au obținut chiar valori false ale deformării, uneori negative. Presupunînd corectă tehnica de măsurare, aceste rezultate pot fi explicate prin deplasarea ovalității conductei măsurate [4.9].

Pentru aprecierea duratei de viață a oțelurilor, poate fi utilizată duritatea de durată. Între rezistența de rupere la fluaj, corespunzătoare unei durate exprimată în ore și duritatea de durată determinată într-o perioadă, exprimată în secunde, există o relație lineară [4.10, 4.11], temperatura de lucru fiind aceeași. Prin urmare din determinări de duritate de durată scurtă, se pot trage concluzii pentru aprecierea rezistenței la fluaj a unui oțel. Coeficienții de transformare trebuie determinați experimental pentru fiecare oțel în parte. Valoarea durității de durată a unui oțel este proporțională cu valoarea durității la probă de scurtă durată, în starea inițială [4.11].

Pentru determinarea duratei restante de funcționare, este necesară cunoașterea eforturilor unitare efective la care este supus materialul în exploatare. Eforturile nu sînt aceleași în întreaga instalație, de exemplu în lungul traseului unei conducte. De aceea este necesar să se cunoască din calcul repartiția eforturilor. În cazul pieselor de formă complicată, valoarea efectivă a efortului maxim nu este întotdeauna cunoscută. În această categorie intră și armăturile conductelor. Rezultatele încercărilor efectuate asupra epruvetelor prelevate din materialul tubular nu pot fi aplicate și armăturilor din acea rețea de conducte. Pentru curbe ovalizate, s-au efectuat probe din care a rezultat raportul dintre timpul de rupere al acestora și timpul de rupere al tronsoanelor drepte [4.14].

De asemenea, la avarii s-a constatat că îmbinările prin sudură au o comportare specifică. Anumite zone ale sudurilor au o rezistență de fluaj mai redusă decît materialul de bază și materialul electrozilor [3.76]. În zona de trecere a sudurii, aportul de căldură pe o porțiune a acesteia este suficient pentru a provoca o modificare parțială a structurii, dar nu și pentru dizolvarea carburilor speciale. De aceea, partea principală a zonei de trecere este supusă unui efect de revenire, care favorizează descompunerea structurii existente. La limita dintre zona de granulație fină și zona de revenire a materialului de bază, începe o coagulare a carburilor speciale, care este intensificată prin tratamentul termic și prin condițiile

de exploatare. Această modificare a structurii are ca efect o diminuare a rezistenței la fluaj. Încercări de fluaj cu epruvete recoapte cu granulație fină și cu epruvete transversale sudate dau valori care se grupează sub curba limită inferioară și ies din zona de dispersie a rezistenței de fluaj a materialului de bază [3.77].

Formarea de fisuri în zona influențată de tratamentul termic de detensionare, numit în literatura anglo-saxonă „*stress relief cracking*" se produce și la sudurile tamburelor și poate provoca spargeri la proba de presiune.

La temperaturi de lucru între 300 și 400°C, se produce un alt fenomen de oboseală, caracterizat prin fragilizarea metalului și reducerea rezistenței sale. Fenomenul se produce mai ales la oțelurile cu structură cristalină fină și cu conținut ridicat de nichel [3.102].

1.4. DEFECTOSCOPIE

Pentru sesizarea defectelor din echipamente și instalații, se efectuează probe profilactice în timpul fabricației, montajului și exploatării. Probele profilactice sînt reglementate prin diverse normative. Aparatajul folosit pentru inspecții și probe se perfecționează și se completează în mod continuu. În cele ce urmează, se menționează unele metode pentru verificarea preventivă a echipamentelor și instalațiilor.

4.4.1. Endoscopia

Pentru examinarea unor zone inaccesibile inspecției directe, fără operații de demontare, se utilizează endoscopul flexibil, cu tijă din fibre de sticlă (fig. 4.19).

Exemplul 4.14. Acest mod de inspecție a fost utilizat la o turbină de 300 MW, care a trebuit oprită din cauza înrăutățirii vidului, ca urmare a unei neetanșeități neidentificate. Zona neetanșă a fost localizată cu un detector cu halogeni la racordul etan-

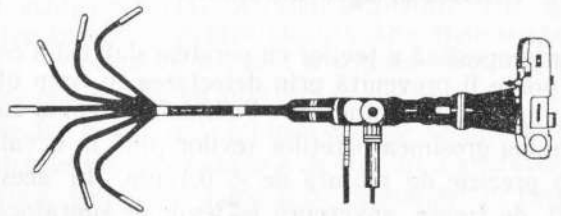


Fig. 4.19. Endoscop flexibil cu tijă din fibre de sticlă.

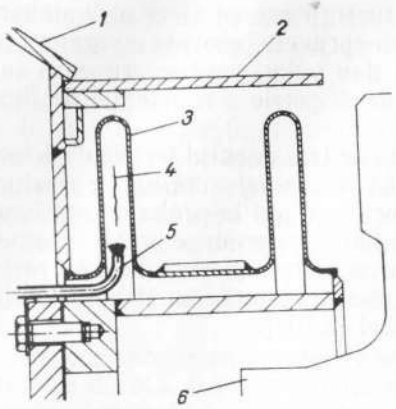


Fig. 4.20. Detectarea cu endoscopul a unei fisuri inaccesibile direct [4.15]: *1* — difuzor de evacuare a aburului; *2* — tablă de protecție contra eroziunii; *3* — compensator ondulat; *4* — fisură; *5* — endoscop; *6* — ax.

ședrii de joasă presiune a unui difuzor de evacuare a aburului. Cu ajutorul endoscopului s-a putut preciza locul neetanșeității, care era o fisură de circa 300 mm lungime și 1 mm lățime într-o bridă a compensatorului de dilatare (fig. 4.20).

Exemplul 4.15 îl constituie controlul efectuat cu endoscopul asupra penultimului rînd de palete mobile al unei turbine de 300 MW. Controlul a fost efectuat prin trecerea endoscopului prin rețeaua formată de paletele mobile și fixe ale ultimei trepte. A putut fi descoperită o fisură într-una din cele 274 palete examinate, ceea ce a permis să se ia măsurile de evitare a avariei iminente [4.15].

În răcitoarele prin injecție se produc dese avarii. În general, acestea sînt inițiate prin ruperea din cauza vibrațiilor a sudurii de prindere la corpul colectorului a tubului interior de protecție. Tubul de protecție desprins perturbă curgerea aburului și poate deteriora țeava de injecție. Aceasta poate să se rupă și nemijlocit, din cauza vibrațiilor. Elementele rupte sînt antrenate în circuitul aburului, unde pot produce diferite perturbații. De asemenea, colectorul răcitorului este solicitat la șoc termic, în absența tubului de protecție. Inspecția cu endoscopul poate preveni, acest gen de avarii prin măsuri luate la timp (v. fig. 3.29) [3.44].

4.4.2. Defectoscopia cu ultrasunete

Spargerea intempestivă a țevilor cu peretele slăbit din cauza eroziunii sau coroziunii poate fi prevenită prin detectarea în timp util a locurilor periclitate, cu ajutorul ultrasunetelor. Prin defectoscopia cu ultrasunete, se poate determina grosimea pereților țevilor pînă la o valoare minimă de 1 mm, cu o precizie de măsură de $\pm$ 0,1 mm. În acest mod, s-au făcut măsurări de mare anvergură la țevile de supraîncălzitor și economizor ale unui cazan supus fenomenului de eroziune prin cenușă. Au

fost verificate toate zonele lustruite prin eroziune și toate coturile. S-au înlocuit toate tronsoanele cu grosimea peretelui mai mică decît o valoare impusă (2,5 mm) [3.123].

Se citează rezultate foarte bune obținute la țevi cu diametrul mai mare sau egal cu 38 mm și grosimea peretelui mai mare sau egală cu 2 mm. Măsurările s-au efectuat cu succes și la coturi, detectîndu-se din timp focarele de avarii [4.16].

4.4.3. Amprente metalografice

Controlul nedistructiv al structurii metalului se poate realiza prin luarea unor amprente. În acest scop, se alege un material potrivit (polistirol). În contact cu un solvent (benzol), materialul de bază se umflă și se înmoaie. Șliful necesar pe suprafața metalului se obține prin atacare cu o soluție de 4% acid azotic în alcool etilic, pentru oțeluri de construcții. Pentru oțeluri inoxidabile, se folosește o soluție de 5 g clorură de cupru și 10 ml acid clorhidric, dizolvate în 100 ml alcool etilic. Înainte de aplicare pe suprafața cercetată, polistirolul se încălzește timp de 30 min în apă de 70°C, pentru a se evita fisurarea proprie. Structurile obținute se pot examina cu microscoape staționare. Au fost controlate în acest mod suduri, conducte de abur, carcase de turbine, palete. Structurile obținute cu ajutorul amprentelor nu se deosebesc practic de șlifuri [4.17]. Metoda permite controlul, cu ocazia reviziilor, a echipamentelor montate în instalații.

4.5. APARATE DE CONTROL AL EFORTURILOR ÎN ECHIPAMENTE

Pentru a preveni depășirea eforturilor admisibile, au fost construite aparate care determină efortul momentan în echipament, îl compară cu efortul admisibil și indică limitele admisibile momentane de variație a încărcării echipamentului. Asemenea aparate sînt utilizate pentru cazane, pentru turbine și pentru blocuri. Aparatele se compun în general din trei părți: o parte de măsură, o schemă electrică, pentru interpretarea valorilor măsurate și un aparat indicator.

Eforturile în materialul echipamentelor termomecanice asimilabile cu tuburi sub presiune sînt generate de presiunea aburului și de diferențele de temperatură. Rotoarele asimilabile cu cilindri în rotație sînt supuse eforturilor generate de forțele centrifuge și de diferențele de temperatură.

Ele se determină pe baza măsurării parametrilor de funcționare, în zona cea mai solicitată, care în cazul turbinelor cu abur este planul treptei de reglaj.

Eforturile mecanice generate de presiunea interioară se determină prin intermediul măsurării puterii, care poate fi considerată proporțională cu presiunea. În acest fel, se obține o viteză de răspuns și o precizie de măsură mai bună. Eforturile termice sînt determinate de diferența maximă de temperatură din material, față de temperatura medie din material. Ele pot fi determinate cu ajutorul unor ipoteze simplificatoare (v. § 3.1.4) privind forma geometrică a elementului supravegheat și ritmul de încălzire. În cazul turbinelor cu abur, simplificările admise privind geometria și ritmul de încălzire conduc la rezultate care se abat destul de mult de la realitate [3.49]. Eforturile unitare mecanice și termice coaxiale se adună și apoi se compun într-un efort unitar echivalent, conform unei teorii a rezistenței materialelor.

Efortul unitar echivalent este exprimat într-o formă aproximativă, care să nu solicite un volum prea mare de calcul de la aparatul de calcul în schemă. Aceste expresii simplificate se verifică prin măsurări și calcule detaliate pe calculatoare electronice.

Aparatul formează și limitele determinate de eforturile unitare admisibile, pentru fiecare temperatură, ținînd seama de variația cu temperatura a limitei de curgere, a limitei de fluaj și a limitei de solicitare alternativă. Rezerva existentă pentru modificarea regimului de funcționare este indicată prin diferite tipuri de aparate, sub formă de diferență de temperatură, diferență de debit de abur, diferență de putere, diferență de debit termic. Aparatele pot fi integrate în circuitele de reglaj automat ale echipamentelor.

Schema bloc a unui aparat de control pentru cazane cu străbatere forțată este reprezentată în fig. 4.21 [4.19]. Efortul unitar echivalent este calculat de aparat pe baza teoriei forței tăietoare maxime. Într-o altă concepție de aparat de control a eforturilor la cazane, acestea sînt compuse pe baza teoriei energiei de deformație [4.20].

Se controlează eforturile în tambure și în colectoare, care, fiind elementele de cazan cu pereții cei mai groși, sînt supuse și eforturilor celor mai ridicate. Prin determinarea eforturilor în colectoare, se obțin în mod indirect și informații asupra încărcării termice prea ridicate a suprafețelor de încălzire. Acestea pot fi provocate fie de poziția flăcării, fie de insuficiența debitului de agent de răcire (în perioada de pornire).

Pentru turbine, au fost construite aparate care controlează eforturile atît în corpul de înaltă presiune, cît și în corpul de medie presiune [4.18, 4.21, 4.22].

Funcționarea coordonată a cazanului și turbinei unui bloc poate fi controlată din punctul de vedere al eforturilor și eventual condusă auto-

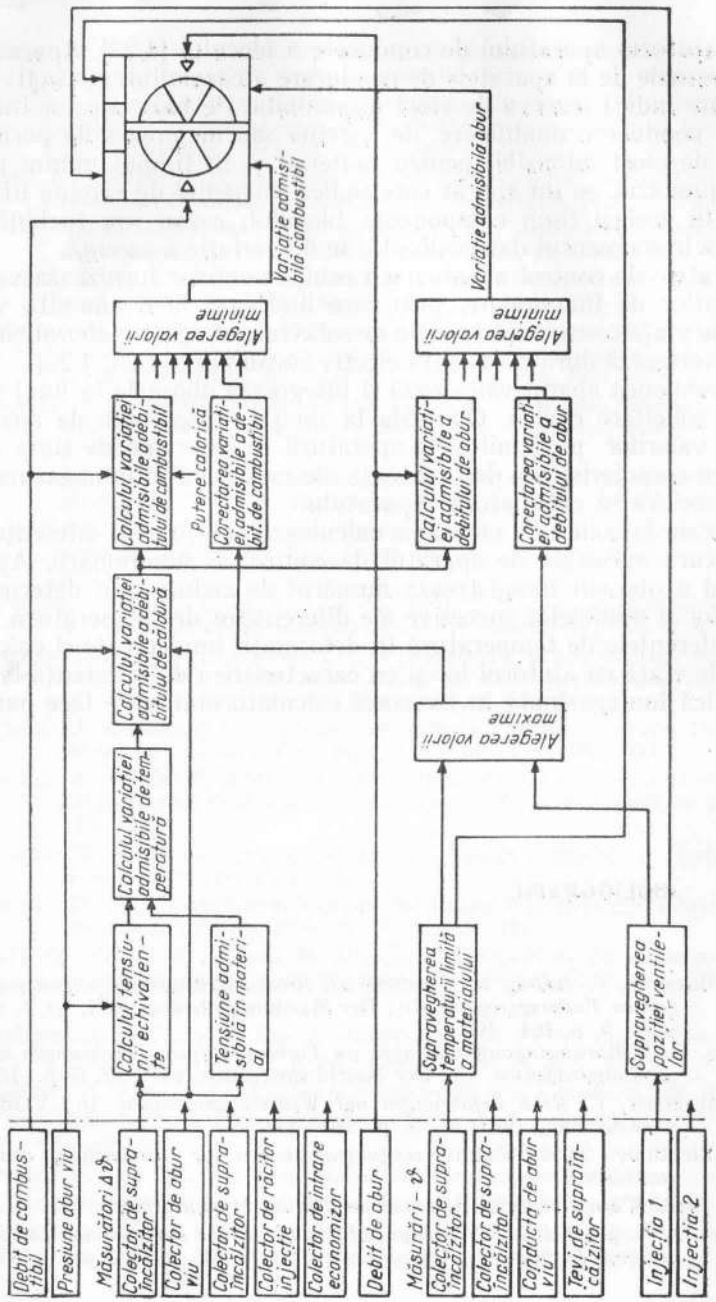


Fig. 4.21: Schemă de principiu a aparatului de control al încărcării unui cazan cu străbatere forțată [4.19].

mat cu ajutorul aparatului de conducere a blocului [4.23]. Aparatul primește semnale de la aparatele de conducere a cazanului, respectiv a turbinei, care indică rezerva de efort disponibilă. Pe baza acestor indicații, sistemul conduce o modificare de sarcină sau un proces de pornire, în limitele de efort admisibil pentru material și în timpul minim posibil. El este prevăzut cu un aparat care indică domeniul de sarcină liberă pe bloc și în același timp componenta blocului, cazan sau turbină, care limitează în momentul dat posibilitățile de variație a sarcinii.

Aparatele de control al solicitării echipamentelor furnizează valoarea parametrilor de funcționare, prin care limitează la o anumită valoare durata de viață consumată pe ciclu de solicitare. Au fost elaborate aparate care contorizează durata de viață efectiv consumată [4.25, 4.26].

Un asemenea aparat calculează și integrează oboseala la fluaj și oboseala la solicitare ciclică. Oboseala la fluaj se calculează de aparat cu mediile valorilor presiunii și temperaturii în intervale de timp relativ mici și cu caracteristicile de rezistență ale materialului înmagazinate sub formă tabelară în calculatorul aparatului.

Oboseala la solicitare ciclică se calculează cu ajutorul diferențelor de temperatură măsurate de aparatul de control al funcționării. Aparatul de calcul a oboselii înregistrează numărul de cicluri prin determinarea maximelor și minimelor succesive ale diferențelor de temperatură, transformă diferențele de temperatură în deformații împiedicate și calculează durata de viață cu ajutorul lor și cu caracteristica de rezistență la solicitare ciclică înmagazinată în memoria calculatorului, care face parte din aparat.

BIBLIOGRAFIE

4.1. Schöllhammer, F. *Beitrag zur Deutung von Relativ-Wellenschwingungsmessungen an grossen Turboaggregaten.* În: Der Maschinenschaden, 1971, nr. 1, p. 1–11 și nr. 5, p. 164–166.

4.2. Peters, G. *Wellenschwingungsmessungen an Turbomaschinen. Erfahrungen und Entwicklungstendenzen.* În: Der Maschinenschaden, 1971, nr. 5, p. 157–163.

4.3. Schöllhammer, F. *Neue Erfahrungen mit Wellenschwingungen.* În: VGB Kraftwerkstechnik, 1973, nr. 5, p. 320–332.

4.4. VDI-Richtlinien 2 059. *Wellenschwingungsmessungen zur Überwachung von Turbomaschinen.*

4.5. DIN 1943. *Wärmetechnische Abnahmeversuche an Dampfturbinen.*

4.6. Cotton, K. C. și Schofield, P. *Analysis of Changes in the Performance Characteristics of Steam Turbines.* În: Transactions of the ASME, B, 1971, apr., p. 225–237.

5. AVARII CARACTERISTICE ALE INSTALAȚIILOR ELECTRICE

(descrierea unor avarii tipice, grupate pe elemente deteriorate)

5.1. AVARIILE LINIILOR ELECTRICE AERIENE

Elementele principale, a căror deteriorare poate provoca ieșirea din funcțiune a unei linii electrice aeriene sînt :

— conductoarele (inclusiv elementele de legătură) ;

— izolatoarele (inclusiv piesele de îmbinare și armăturile de protecție) ;

— stîlpii.

Trebuie menționat, ca o particularitate a liniilor electrice aeriene — determinată de faptul că izolația este constituită în mare parte de către aer — că anumite avarii pot avea loc și fără deteriorarea vreunui element constructiv și anume :

— avariile datorate supratensiunilor atmosferice care provoacă străpungeri ale spațiului dintre conductoare, respectiv între conductoare și elementele legate la pămînt ;

— avariile datorate unor deplasări temporare ale conductoarelor sub acțiunea vîntului foarte intens și în rafale, precum și sub acțiunea depunerilor de chiciură.

5.1.1. Deteriorările conductoarelor și clemelor de legătură

Conductoarele liniilor aeriene sînt expuse detriorării ca urmare : a depășirii efortului mecanic admisibil (rupere cu alungire), a vibrațiilor (rupere prin crăpare succesivă a firelor componente a conductoarelor multifilare), acțiunii corozive a atmosferei (corodare treptată a firelor, urmată de rupere prin alungire), acțiunii termice a arcului electric de mare putere, acțiunii de electroeroziune în zonele clemelor electrice de legătură. Un caz special reprezintă : alungirea și ruperea conductorului ca urmare a supraîncălzirii conductorului prin suprasarcină.

Fig. 5.1. Ruperea conductorului prin depășirea rezistenței mecanice.

Clemele de legătură electrică se deteriorează ca urmare a fenomenului de electro-eroziune în cazul contactului imperfect și a supraîncălzirii, în caz de suprasarcină sau scurtcircuit. Clemele de legătură electrică și mecanică se mai pot deteriora și din cauza suprasolicitării mecanice sau a execuției defectuoasă, insuficient de rezistentă mecanic.

Recunoașterea fenomenului fizico-chimic care a produs deteriorarea, prezintă o deosebită importanță pentru remedierea și prevenirea repetării avariei.

Depășirea rezistenței mecanice se manifestă prin alungirea conductorului și subțierea treptată a firelor înainte de rupere (fig. 5.1). Ruptura va avea loc de obicei în zona cu efort specific maxim, care poate fi determinată prin efectuarea calculului mecanic pentru cazul respectiv.

Ruperea prin vibrații se manifestă prin crăparea succesivă a firelor componente ale conductorului multifilar, urmată de ruperea prin alungire a restului de conductoare — a căror rezistență la rupere a fost depășită. Ruperea va avea loc în zona cea mai solicitată la vibrație, de obicei în apropierea punctelor de fixare (fig. 5.2).

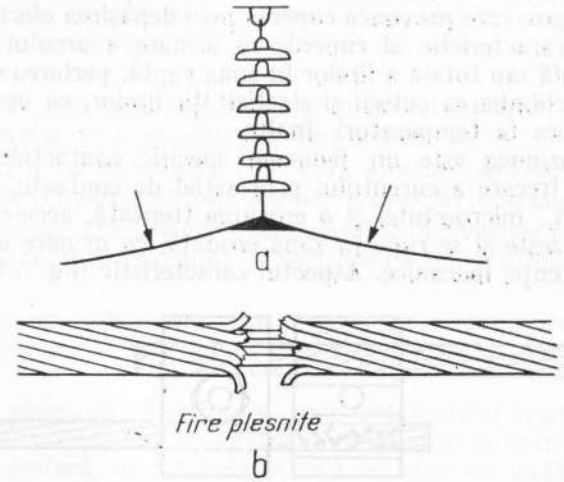


Fig. 5.2. Ruperea conductorului ca urmare a vibrațiilor.

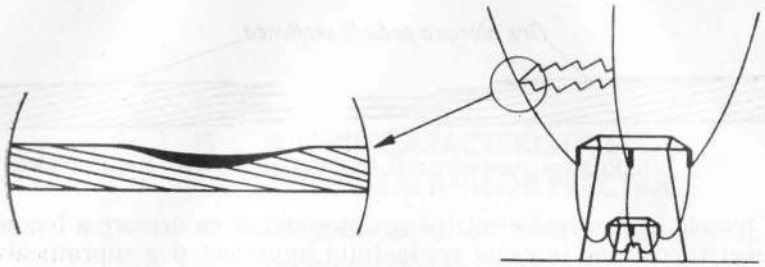


Fig. 5.3. Deteriorarea termică a conductorului, prin arc.

Ruperea prin coroziune se manifestă prin deteriorarea treptată a firelor componente ale conductorului multifilar. Acest fenomen apare în special la conductoare de aluminiu sau oţel-aluminiu şi poate fi iniţiat la nivelul conductorului de oţel, care se oxidează din cauza ineficienţei stratului protector de zinc, sau poate fi iniţiat la nivelul firelor de aluminiu atacate de anumite substanţe aflate în suspensie în atmosfera poluată din apropierea unor combinate chimice, întreprinderi metalurgice, miniere sau zone agricole (în care se folosesc îngrăşăminte chimice).

Acţiunea termică a arcului electric de mare putere, ce poate să apară în deschidere sau între faze şi stîlpi, poate să provoace topirea parţială sau integrală a conductorului în zona „piciorului de arc" (fig. 5.3). Temperatura înaltă a arcului electric poate topi parţial sau integral conductoarele, în funcţie de valoarea curentului şi durata arcului electric. Desigur, pentru ruperea conductorului, este suficient ca topirea să reducă secţiunea pînă la o valoare care provoacă ruperea prin depăşirea efortului mecanic.

Aspectul caracteristic al ruperii, ca urmare a arcului electric, este topirea parţială sau totală a firelor în zona ruptă, perlarea capetelor firelor rupte şi schimbarea culorii şi elasticităţii firelor, ca urmare supraîncălzirii acestora la temperaturi înalte.

Electroeroziunea este un fenomen specific contactelor imperfecte. În zonele de trecere a curentului prin astfel de contacte, apar încălziri locale, oxidări, microscîntei şi o eroziune treptată, accelerată. Conductorul se încălzeşte şi se rupe în zona erodată, ca urmare a topirii sau a scăderii rezistenţei mecanice. Aspectul caracteristic (fig. 5.4) constă din :

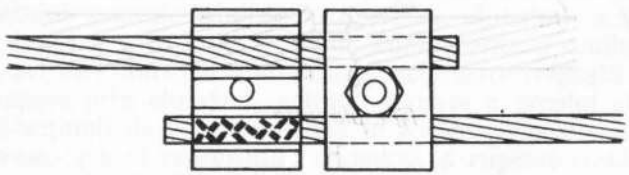


Fig. 5.4. Eroziunea contactelor în clemele electrice.

suprafeţele de contact erodate, oxidate, firele parţial topite, erodate, decălite.

Alungirea şi ruperea conductorului, ca urmare a supraîncălzirii prin suprasarcină, se caracterizează prin aspecte specifice : decălirea şi schimbarea culorii conductorului, ce apar în timpul funcţionării la temperatură ridicată şi apoi subţierea conductoarelor.

Clemele de legătură electrică se deteriorează prin procesul de electroeroziune descris mai sus (la conductor), atunci cînd contactele de trecere sînt imperfecte, ca urmare a montajului neatent, a unei execuţii necorespunzătoare a clemei, sau utilizării unei cleme nepotrivite conductorului respectiv. Clema deteriorată prin electroeroziune prezintă suprafeţe de contact rugoase, înnegrite, ca urmare a scînteierilor şi încălzirii locale, elementele de contact şi şuruburile de strîngere decălite.

Clemele de legătură electrică şi mecanică pot fi avariate şi ele prin electroeroziune — dar acest fenomen este rar deoarece aci presiunea de contact este în general asigurată prin forţele de tracţiune ce se transmit. Cel mai frecvent ele se deteriorează sub acţiunea solicitărilor mecanice sau de scurtcircuit, ca urmare a unor defecţiuni constructive iniţiale (secţiuni insuficiente, material necorespunzător), sau de execuţie (deteriorarea parţială a clemei cu ocazia îmbinării).

5.1.2. Deteriorările izolatoarelor şi ale pieselor anexe

Izolatoarele, inclusiv armăturile metalice de îmbinare şi de protecţie pot fi deteriorate ca urmare a depăşirii eforturilor mecanice admisibile, a vibraţiilor, a străpungerii sau conturării izolaţiei şi a solicitărilor termice datorate curenţilor de scurtcircuit.

Deteriorările enumerate mai sus se manifestă diferit, în funcţie de tipul izolatoarelor şi a armăturilor respective.

La *izolatoarele de tip suport* (fig. 5.5), efortul mecanic se aplică sub formă de moment încovoietor sau sub forma unor forţe axiale, de smulgere.

În primul caz, sub acţiunea momentului încovoietor poate avea loc ruperea izolatorului (de exemplu în secţiunea s—s), sau îndoirea suportului metalic.

În al doilea caz, sub acţiunea forţei verticale, izolatoarele pot fi smulse din suport şi anume, atunci cînd îmbinarea izolator-suport este defectuoasă.

Ca un caz special de deteriorare, tipic izolatoarelor-suport, se menţionează desfacerea sistemului de legătură a conductorului la izolator. Aceasta trebuie să se desfacă, în cazul depăşirii unei anumite forţe longitudinale (cca. 1 000—1 500 N), pentru a feri stîlpul de eforturi mecanice unilate-

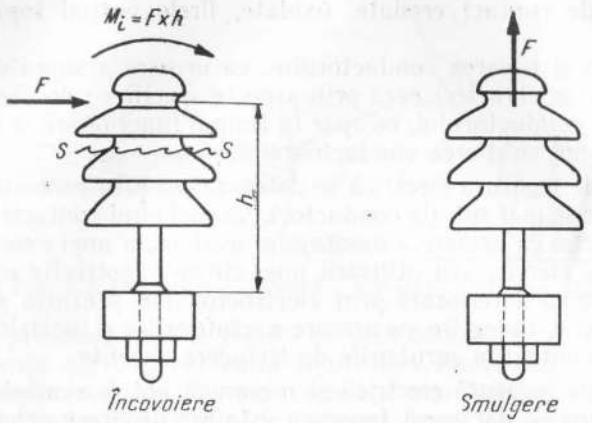


Fig. 5.5. Deteriorări tipice ale izolatoarelor suport.

rale, care pot apare în aceste cazuri (fig. 5.6). Sînt însă numeroase cazuri cînd aceste legături se desfac în mod accidental, de exemplu, ca urmare a oscilaţiilor provocate de vînt intens, cu rafale.

Conturnarea izolatoarelor de tip suport, are unele aspecte specifice, dată fiind utilizarea acestor izolatoare în reţelele de 6—20 kV :

— *Conturnarea în urma supratensiunilor atmosferice* : este deseori posibilă deoarece nivelul supratensiunilor atmosferice pe liniile electrice aeriene depăşeşte de obicei nivelul de ţinere al izolaţiei din aceste reţele. Curentul de punere la pămînt fiind în general limitat prin sistemul de tratare al neutrului, efectul termic al arcului de punere la pămînt este modest şi izolatoarele nu se deteriorează. Numai atunci cînd arcul se extinde şi la a doua fază, curentul devine suficient de mare pentru a putea deteriora izolatorii-suport — în schimb atunci intervine declanşarea rapidă a liniei.

— *Conturnarea în urma şuntării* datorate păsărilor (fig. 5.7) şi conturnarea în urma poluării izolaţiei (fig. 5.8) evoluează în mod asemănător.

În majoritatea cazurilor de conturnare, cînd curentul de punere la pămînt e limitat, deteriorările sînt neînsemnate. Numai atunci cînd

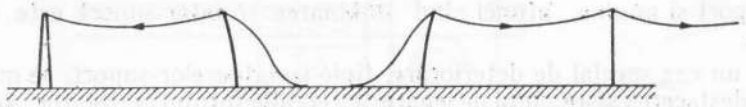


Fig. 5.6. Apariţia eforturilor unilaterale (dezechilibrări) la linii aeriene, în cazul ruperii unui conductor.

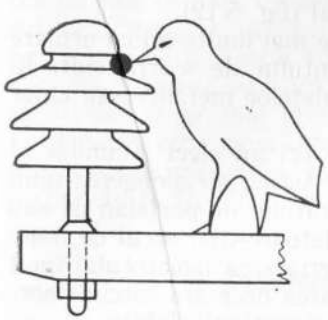


Fig. 5.7. Conturnarea izolatoarelor provocată de păsări

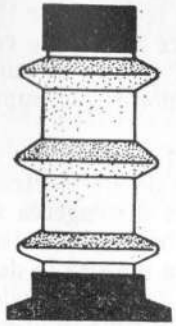


Fig. 5.8. Conturnarea izolatoarelor provocată de poluare.

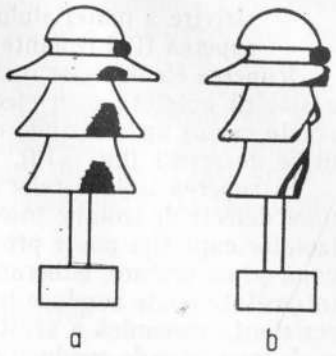


Fig. 5.9. Distrugerea izolatoarelor provocată de arcul electric de conturnare.

conturnările sînt simultan pe mai multe faze, apare arderea glazurii sau spargerea parţială a izolatoarelor (fig. 5.9).

La izolatoarele lanţ, efortul mecanic apare exclusiv sub formă de tracţiune în lungul axei longitudinale (fig. 5.10).

În consecinţă deteriorările mecanice apar sub formă de :

— rupere a elementelor metalice de îmbinare ;

— smulgere a elementelor de armare ;

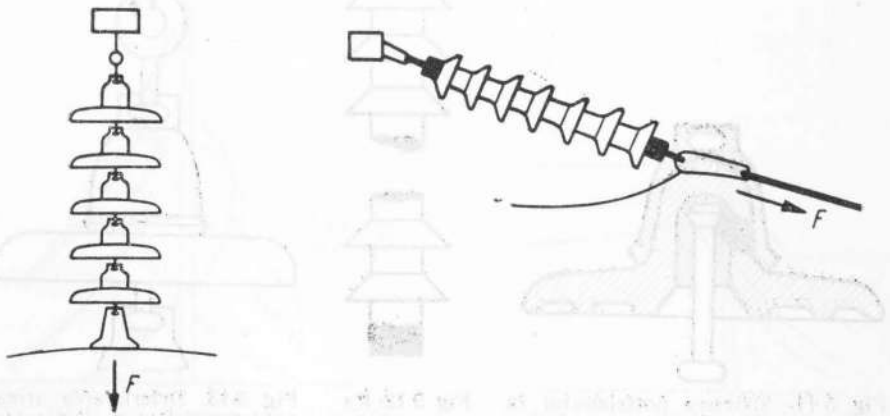


Fig. 5.10. Solicitările izolatoarelor-lanţ.

— strivire a materialului izolant la izolatoarele capă-tijă (fig. 5.11) ;
— ruperea tijei izolante (la izolatoarele tijă) (fig. 5.12).

Ruperea elementelor metalice are loc de cele mai multe ori ca urmare a slăbirii acestora prin efectul termic al curentului de scurtcircuit. În aceste cazuri apar vizibile decolorări ale suprafețelor metalice sau chiar urme de arsuri (fig. 5.13).

Și ruperea izolatoarelor lanț este de multe ori un efect secundar al unor defecte de izolație însoțite de arc electric. Astfel, străpungerea unui izolator capă-tijă poate provoca distrugerea stratului de porțelan de sub capă și, ca urmare, eliberarea bolțului. La izolatoare-tijă, arcul de mare intensitate poate conduce în așa măsură la deteriorarea izolatorului încît rezistența mecanică a acestuia scade sub valoarea necesară sarcinii normale transmise de conductor și se rupe în dreptul secțiunii slăbite.

Deteriorările de natură electrică apar la izolatoarele-lanț, cel mai des sub formă de conturnări, ca urmare a formării unor straturi de depuneri conducătoare pe suprafețele izolatoarelor, sau ca urmare a unor supratensiuni.

Străpungerile izolatoarelor capă-tijă sînt cazuri rare — de obicei urmări ale unor defecțiuni mecanice, sau constructive. Izolatoarele tijă sînt ferite de străpungere.

Deteriorările produse de conturnări depind de valoarea și durata curentului de arc electric, precum și de calitatea armăturilor de protecție. Dacă energia degajată în arcul electric este limitată prin acționarea rapidă a

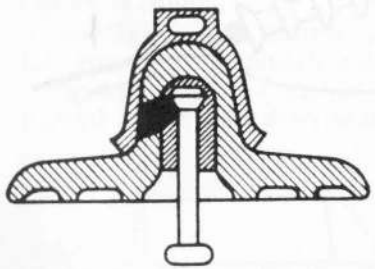


Fig. 5.11. Strivirea porțelanului în izolatorul cu capă.

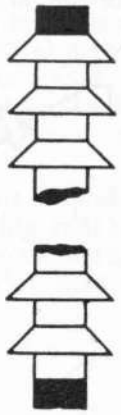


Fig. 5.12. Ruperea izolatorului-tijă.

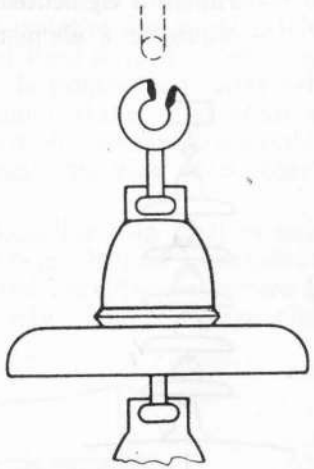


Fig. 5.13. Deteriorarea armăturilor metalice ale izolatoarelor (arsuri, topiri).

protecției maximale de curent și scoaterea liniei de sub tensiune, conturnarea nu este urmată de deteriorări vizibile. Dacă însă scoaterea liniei de sub tensiune prin declanșarea întreruptoarelor este întîrziată sau dacă armăturile de protecție nu îndepărtează în suficientă măsură arcul electric, conturnarea este urmată de deteriorări superficiale (arsuri ale glazurii), sau chiar mai profunde (deteriorări mecanice ale izolatoarelor).

Arcul electric prea intens (sau de prea lungă durată) își lasă urmele atît pe armăturile metalice, cît și pe punctele de fixare pe stîlpi, sub formă de puncte topite, formări de perle metalice ș.a.

5.1.3. **Deteriorările stîlpilor și fundațiilor**

Stîlpii și fundațiile se deteriorează în principal sub acțiunea forțelor mecanice, aplicate direct (presiunea vîntului pe stîlp), sau prin intermediul conductoarelor, sau sub acțiunea corozivă a unor elemente agresive din atmosferă. În zone circulate sînt frecvente cazurile de deteriorare prin lovire de către vehicule, utilaje de construcții, sau mașini agricole.

Modul de deteriorare depinde de locul și de felul aplicării forțelor, precum și de eventuale lipsuri în proiectarea sau execuția stîlpilor.

Deteriorarea consolelor are loc în două cazuri (fig. 5.14 și 5.15) :

— depășirea sarcinilor verticale (depunere masivă de ghiață pe conductoare — fig. 5.14) ;

— depășirea sarcinilor în lungul liniei (de ex. ca urmare a ruperii unui stîlp sau a unui conductor — fig. 5.15).

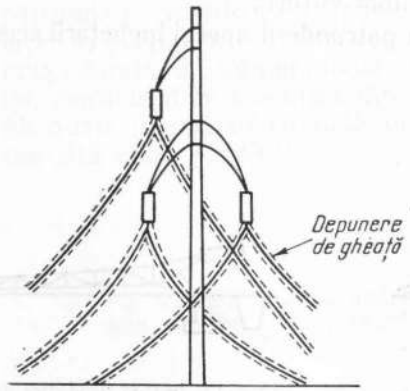


Fig. 5.14. Deteriorarea consolelor la depășirea forțelor verticale.

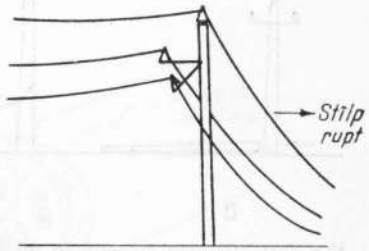


Fig. 5.15. Deteriorarea consolelor la depășirea forțelor orizontale.

Se menționează că prin deformarea consolei, efortul transmis în stîlp se limitează de obicei la valori nepericuloase pentru stîlp.

Ruperea stîlpului are loc în cazurile în care depășirea sarcinilor nu se poate rezolva prin deformarea consolelor sau prin desfacerea legăturilor la izolatoare. Astfel, ruperea stîlpilor, perpendicular pe linie, apare ca urmare a unui vînt foarte intens, eventual sub formă de rafale și în special atunci cînd suprafața expusă vîntului este mărită prin depuneri de pe conductoare. Aceste eforturi de obicei nu pot fi preluate, respectiv diminuate prin deformarea consolelor.

Ruperea stîlpilor în lungul liniei apare de obicei în cazul unor dezechilibrări a forțelor de tracțiune din conductoare (rupere de conductor, de lanț de întindere etc.) (v. fig. 5.6).

La ruperile de stîlpi este semnificativă zona de rupere (fig. 5.16 și 5.17). Astfel, în cazul fig. 5.16, *a*, ruperea a avut loc în secțiunea corespunzătoare efortului maxim, deci se pune în primul rînd problema verificării efortului real raportat la cel de calcul ; în cazul fig. 5.16, *b* — se pune și problema calității îmbinării, iar în cazul fig. 5.17, se pune problema analizării dimensiunilor fundației, respectiv a calităților reale ale terenului.

Ruperea stîlpilor poate să apară sub acțiunea unor sarcini dinamice, cu vîrfuri momentane care depășesc sarcina statică de rupere. Astfel de cazuri pot apare în perioadele de furtună cu vînt în rafale sau în momentul ruperii unui lanț de izolatoare. La ruperea stîlpilor trebuie analizat cu mare atenție starea metalului, întrucît pot apare slăbiri însemnate sub acțiunea coroziunilor.

Fundațiile se mai pot deteriora datorită următoarelor cauze :

— spălarea terenului ca urmare a unor viituri ;

— crăparea fundației ca urmare a pătrunderii apei și înghețării acesteia.

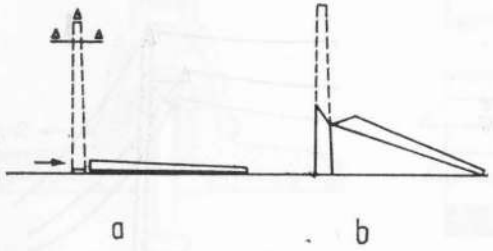


Fig. 5.16. Rupere de stîlp în secțiunea efortului maxim (a) și rupere într-o secțiune de îmbinare (b).

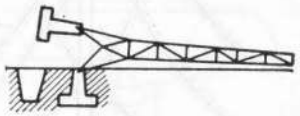


Fig. 5.17. Ieșirea fundației din sol a unui stîlp

5.2. AVARIILE LINIILOR ELECTRICE SUBTERANE

Deteriorările liniilor electrice subterane se localizează în principal astfel :

— deteriorări în cablul propriu-zis ;

— deteriorări în zona manșoanelor de legătură, sau a cutiilor terminale.

5.2.1. Deteriorări în cablul propriu-zis

Deteriorările cablurilor se manifestă în final prin defecte de izolație (puneri la pămînt, scurtcircuite), acestea fiind în principal consecințele următoarelor procese : deteriorarea învelișurilor de protecție și strivirea izolației sub acțiunea unor eforturi externe, sau deteriorarea izolației ca urmare a unor defecțiuni de fabricație sau de montaj și a modificării unor calități fizico-mecanice. Deteriorări datorate supratensiunilor sînt extrem de rare : rezerva de izolație a cablurilor este mare, protecția în general bună, iar undele de supratensiune sînt rapid amortizate prin capacitatea mare a cablurilor.

Procesul de deteriorare a izolației, ca urmare a deteriorării învelișurilor de protecție, se desfășoară după următoarea schemă : la început apare o crăpătură sau o fisură în învelișul de protecție exterior (fig. 5.18) — de exemplu din cauza manevrării neatente la pozare, din cauza unei loviturii primite în timpul unor lucrări de săpături efectuate în apropierea cablului, sau din cauza corodării acestui înveliș (fig. 5.19). Umiditatea pătrunde pe această cale și provoacă treptat scăderea rezistenței de izolație în porțiunea de cablu respectivă. Acest proces este în general de lungă durată, de ordinul lunilor, depinzînd desigur de mărimea crăpăturilor, conținutul de umiditate din zona înconjurătoare și de tipul izolației (de hîrtie impregnată cu masă obișnuită, cu masă nemigratoare, de PVC, sau altă masă plastică).

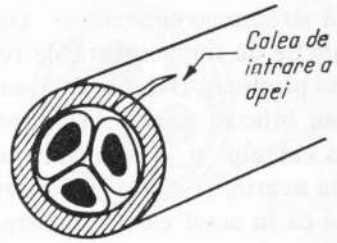


Fig. 5.18. Pătrunderea umidității prin crăpături ale mantalei de protecție.

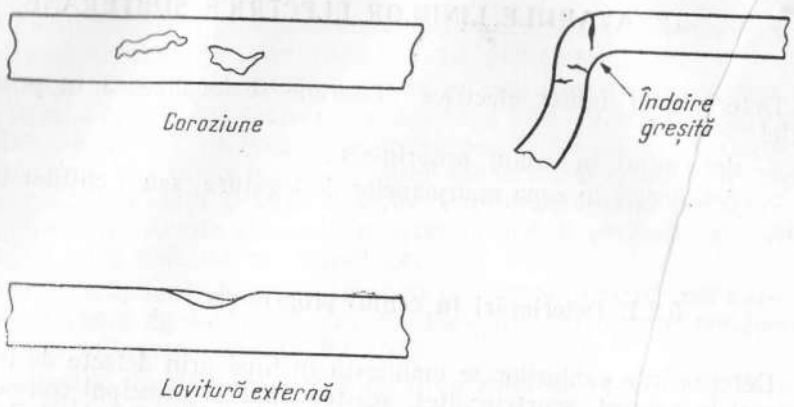


Fig. 5.19. Deteriorări tipice ale mantalelor de protecție.

Se menționează că izolațiile de masă plastică sînt și ele sensibile la umiditate, deși în mai mică măsură decît hîrtia impregnată.

La cablurile cu ulei sub presiune, deteriorarea mantalei are drept consecință pierderi de ulei, manifestîndu-se prin scăderea presiunii. Completînd uleiul se poate împiedica, temporar, infiltrarea apei.

Deteriorările de izolație de această natură apar pe traseul cablului și se manifestă inițial ca puneri la pămînt, transformîndu-se uneori în scurtcircuite bi(tri)fazate. Dacă defectul a fost deconectat în timp scurt, volumul deteriorării rămîne limitat și uneori se pot constata urmele și natura deteriorării învelișului și în special dacă este caz de coroziune.

Procesul de degradare termică a izolației poate să apară pe căi diferite. Cea mai simplă este ca urmare a funcționării de lungă durată la o sarcină mai mare decît cea normală, respectiv la un regim de temperatură ridicată la nivelul izolației principale. În consecință, rigiditatea dielectrică scade treptat și în momentul cînd atinge nivelul tensiunii de funcționare, urmează străpungerea izolației. Durata acestui proces este relativ lungă, fiind funcție de temperatura de regim și de natura izolației (hîrtie, ulei, sau masă plastică). Deteriorarea se manifestă de la început prin scurtcircuit mono sau bifazat și are ca aspecte caracteristice: temperatură mare în masa cablului și în solul din jur (care se menține timp de mai multe ore după avarie) și modificarea structurii izolației pe tot traseul. Se menționează că în acest caz cablul are izolația deteriorată pe toată lungimea

care a funcționat în regim de temperatură mărită și nu poate fi remediat printr-o reparație locală.

Regimuri îndelungate de temperatură ridicată pot apare însă și în anumite puncte ale traseului fără să se fi depășit sarcina nominală. Astfel de cazuri sînt în zone cu rezistivitate termică mărită, de aglomerare a mai multor cabluri, de intersecții sau apropieri de conducte calde și alte instalații asemănătoare.

În astfel de cazuri, creșterea de temperatură se limitează numai la porțiunea de traseu respectivă, deci remedierea poate fi făcută prin înlocuirea porțiunii îmbătrînite.

Degradarea termică poate fi și consecința unor fenomene tranzitorii, ca de exemplu scurtcircuite nedeconectate în timp util. În astfel de situații, la cabluri cu izolație de hîrtie impregnată apare degradarea hîrtiei iar la cabluri cu izolație de masă plastică, topirea izolației și deplasarea relativă a conductoarelor cablului (fig. 5.20).

Alegerea necorespunzătoare a ecranului, modificarea în timp a condițiilor de legare la pămînt a rețelei sau alte cazuri asemănătoare, pot conduce la depășirea curentului admisibil prin ecran. În astfel de cazuri poate să apară deteriorări ale izolației de sub ecran sau a învelișurilor protectoare.

În ultima vreme, ca urmare a creșterii volumului de lucrări de construcții, a apărut un mare număr de cazuri de tăiere a cablurilor cu excavatoare sau alte utilaje asemănătoare. În aceste cazuri cablul este parțial sau total retezat, deci deteriorarea este în principal mecanică.

O problemă specială o prezintă pierderea de ulei ce apare la cablurile cu izolație de hîrtie impregnată, în special în cazurile de pozare între nivele diferite. Prin încălzirea sub sarcină a cablului, masa de impregnare se fluidifică și are tendința de a se scurge din cablu prin cutiile terminale aflate la nivelul inferior (fig. 5.21), dacă acestea nu sînt suficient de etanșe, sau dacă diferența de nivel este mai mare decît cea admisibilă pentru cabluri cu izolație de hîrtie. Porțiunea de cablu aflată la nivelul superior rămîne atunci fără ulei și își pierde astfel calitățile izolante.

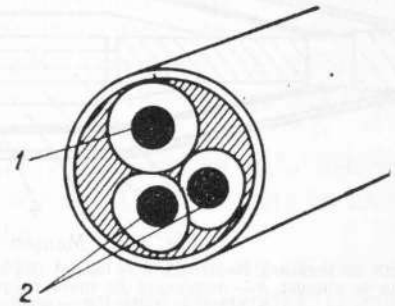


Fig. 5.20. Deplasarea conductelor unui cablu cu izolație de masă plastică, ca urmare a unui scurtcircuit:
1 — vînă intactă; *2* — vine deformate.

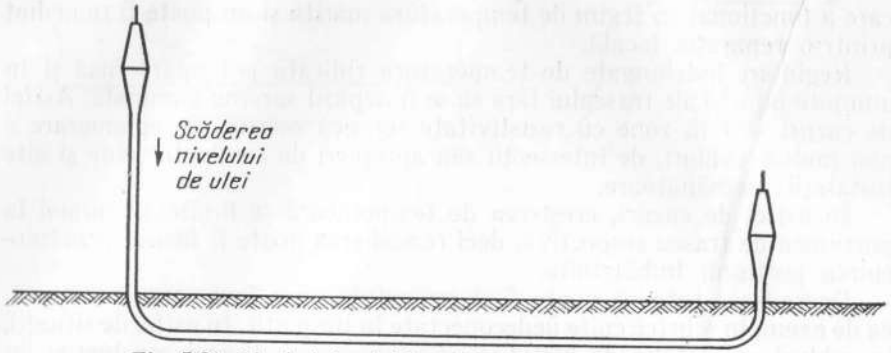


Fig. 5.21. Pierderi de ulei la cablurile cu izolație de hîrtie.

5.2.2. Deteriorări în zona manșoanelor de legătură sau a cutiilor terminale

Manșoanele de legătură și cutiile terminale reprezintă puncte slabe ale traseelor de cabluri, din două motive. În primul rînd pentru că în aceste locuri se modifică geometria cablurilor, deci apare deformarea cîmpului electric și, în același loc, apar și neomogenități în structura izolației (fig. 5.22-23). În al doilea rînd, aceste elemente se execută după pozarea cablului, în condiții de șantier și cu personal de calificare variată. În consecință în punctele respective apar simultan solicitări mărite din cauze constructive și nesiguranță sporită din cauze subiective.

Defectele caracteristice rezultă din aceste condiții și sînt următoarele :

— defectele pieselor de contact ;
— defectele învelișurilor de protecție și a ecranelor ;
— defectele straturilor izolante ale manșonului sau cutiei terminale ;
— defecte în cablu, în apropierea manșonului sau cutiei terminale.

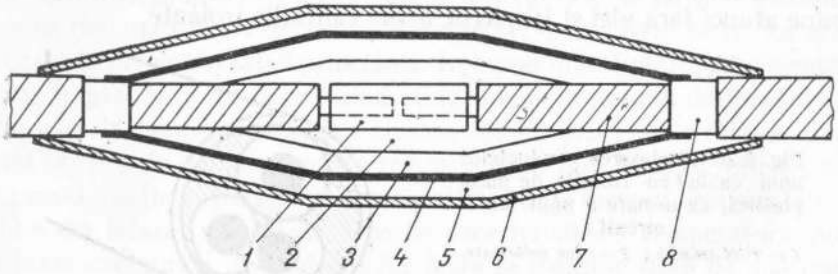


Fig. 5.22. Manșon de legătură:
1 — clemă de legătură electrică ; *2* — bandaj din hîrtie uleiată ; *3* — umplutură de masă galbenă ; *4* — cutie de plumb ; *5* — umplutură de masă neagră ; *6* — cutie de fontă ; *7* — izolație (de hîrtie) a vinei de cablu ; *8* — mantaua de plumb a cablului.

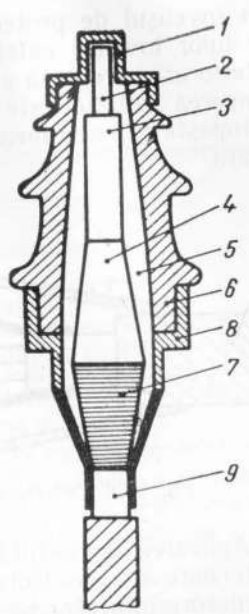


Fig. 5.23. Cutie terminală ;
1 — capac metalic ; *2* — conductorul cablului ; *3* — izolația cablului (hîrtie) ; *4* — întărirea izolației cu bandă de hîrtie ; *5* — masă galbenă ; *6* — izolator (porțelan) ; *7* — condeflector (bandă sau sîrmă de cupru sau aluminiu) ; *8* — flanșă ; *9* — manta de plumb.

Defectele în piesele de contact apar de obicei ca urmare a unor deficiențe de confecționare sau de montare a piesei de contact, care provoacă încălzirea excesivă și deteriorarea treptată a contactului. Ca urmare directă poate avea loc întreruperea contactului, și în cazuri extreme, explozia manșonului sau a cutiei terminale, datorită arcului electric care a apărut în locul întreruperii. Energia degajată în locul întreruperii depinde în principal de valoarea curentului în momentul respectiv. Situația cea mai gravă apare atunci cînd un curent de scurtcircuit trece prin contactul deja slăbit, aflat în preajma desfacerii. În astfel de cazuri este posibilă explozia manșonului sau cutiei terminale. Dacă întreruperea contactului are loc în condițiile trecerii unui curent mai mic, este posibilă stingerea arcului, respectiv întreruperea curentului sub acțiunea masei izolante topite sau gazeificate ; cablul rămîne întrerupt pe faza respectivă (fig. 5.24).

Încălzirea excesivă a contactelor poate conduce și la deteriorarea izolației din manșon sau din cutia terminală, încă înainte ca încălzirea să provoace întreruperea contactului.

Defectele învelișurilor de protecție și a ecranelor au ca urmare slăbirea izolației și străpungerea între faze sau față de pămînt. Crăpăturile

din învelişul de protecţie — urmări ale unor execuţii defectuoase sau ale unor lovituri externe — permit infiltrarea apei şi conduc astfel la deteriorarea treptată a izolaţiei. Se menţionează că în multe cazuri străpungerea izolaţiei este urmată de refacerea ei, pentru că masa izolantă se topeşte sub acţiunea arcului şi poate pătrunde în zona cu izolaţia perforată.

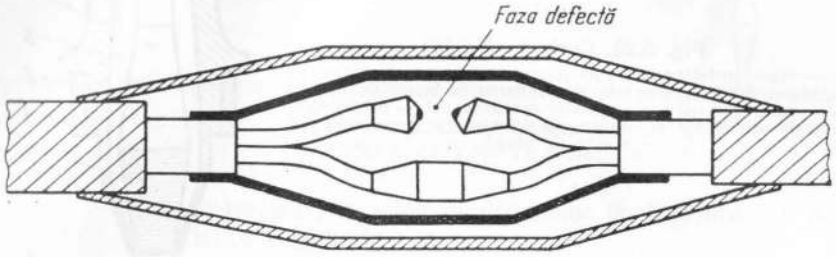


Fig. 5.24. Deteriorarea unui manşon de legătură la piesa de contact.

Aplicarea neîngrijită a straturilor izolante, nerespectarea condiţiilor de turnare a masei izolante, utilizarea unor materiale necorespunzătoare sau necorespunzător păstrate înainte de montare, sînt la originea numeroaselor străpungeri ale izolaţiei în manşoane sau în cutiile terminale. Este suficientă nerespectarea uneia din condiţiile de calitate, ca de exemplu : murdărirea benzilor izolante, umiditatea în masa de turnare, temperatură prea mică sau prea mare de turnare a masei, cantitate insuficientă de masă, ş.a., pentru că după 3—6 luni de funcţionare, manşonul de legătură să fie străpuns.

În această privinţă, cele mai sensibile elemente sînt cutiile terminale de tip exterior. Fiind supuse unor variaţii mari de temperatură, straturile izolante şi în special masa de turnare se dilată, respectiv se contractă 1—2 ori pe zi. Dacă execuţia este neîngrijită, aceste variaţii de dimensiune conduc la absorbţie de umezeală şi, în final, la străpungere. Se menţionează că procesul de absorbţie de umezeală poate avea loc şi pe calea umidităţii conţinute în aerul atmosferic şi care se precipită pe suprafeţele interioare, în momentele de răcire a cutiei terminale.

O categorie specială de defecte sînt cele ce apar în cablu, în imediata apropiere a manşonului sau cutiei terminale (fig. 5.25). Deoarece ele se datoresc tot unor defecţiuni de montare a manşoanelor de legătură sau a cutiilor terminale, au fost trecute în această categorie de defecte şi nu la defectele cablului propriu-zis.

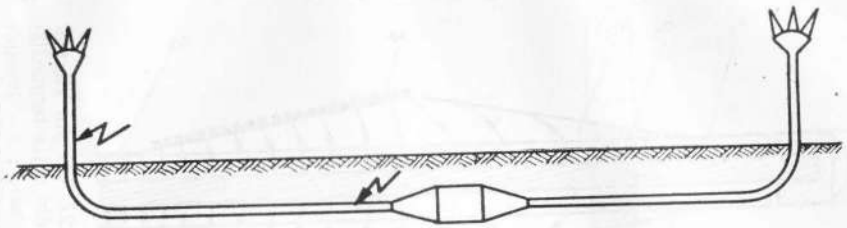


Fig. 5.25. Deteriorări în apropierea accesoriilor.

Procesul tipic de deteriorare decurge în una din variantele următoare :

a. Capsularea capătului de cablu se demontează în vederea execuţiei manşonului sau cutiei terminale. Execuţia se prelungeşte pe mai multe zile şi în acest interval de timp umiditatea pătrunde în lungul vînelor cablului. Acţiunea de slăbire a izolaţiei continuă în lunile ce urmează execuţiei manşonului, şi la 2—3 luni după montare izolaţia este străpunsă — nu în manşon, ci la o distanţă de 50—150 cm de manşon.

b. Cu ocazia desfacerii straturilor izolante în vederea execuţiei manşonului — sau cu ocazia lipirii manşonului de plumb la cămaşa de plumb a cablului — izolaţia este deteriorată. Această deteriorare progresează apoi relativ lent pînă la străpungere şi deteriorările de acest gen sînt de obicei în imediata apropiere a manşonului sau a cutiei terminale.

O categorie specială de defecte o constituie cele rezultate din nerespectarea principiilor de electrostatică ce stau la baza tehnologiei manşoanelor de legătură şi a cutiilor terminale, în special la cablurile avînd ecran individual pe fază. În zona accesoriilor, cîmpul electric prezintă discontinuităţi şi în acelaşi timp nici materialele izolante componente nu mai sînt omogene. Astfel, în zona manşonului de legătură apare o porţiune modificată a cîmpului radial omogen (fig. 5.26), avînd unele zone cu concentraţie mare a liniilor de forţă, respectiv apariţii de componente tangenţiale.

În zona cutiei terminale, cîmpul radial trece într-un cîmp de formă mai complicată (fig. 5.27), cu componente tangenţiale pronunţate. Se remarcă faptul că în zonele cu solicitări electrostatice mărite izolaţia este realizată cu straturi şi cu mase aplicate la faţa locului, în condiţii de şantier, deci cu riscul de a avea neomogenităţi mari din punct de vedere al materialelor componente. De aceea apar frecvent defecte datorite unor suprasolicitări locale, ca de exemplu prin neaplicarea corectă a straturilor semiconductoare la un manşon de legătură (fig. 5.28), sau prin neîntreruperea la locul potrivit a ecranului exterior la o cutie terminală (fig. 5.29).

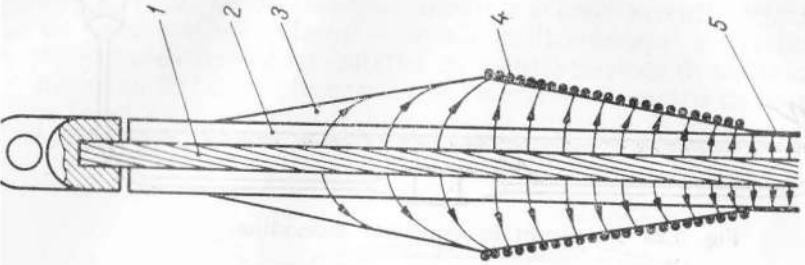


Fig. 5.27. Cîmpul electrostatic din cutia terminală:
1 — conductor; *2* — izolație; *3* — izolație suplimentară (bandă) *4* — con deflector din sîrmă de cupru sau aluminiu; *5* — ecranul cablului.

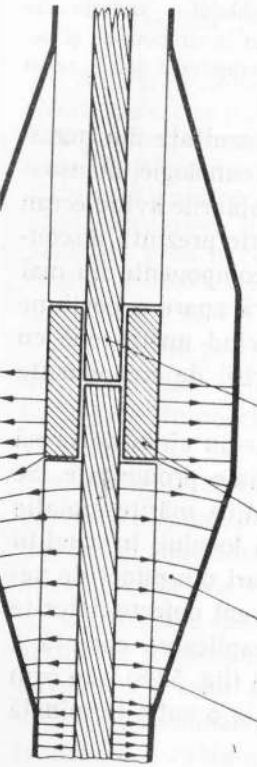


Fig. 5.26. Cîmpul electrostatic din manșonul de legătură (al unui cablu monofazat):
1 — ecran; *2* — izolație hîrtie; *3* — clemă de legătură; *4* — conductor

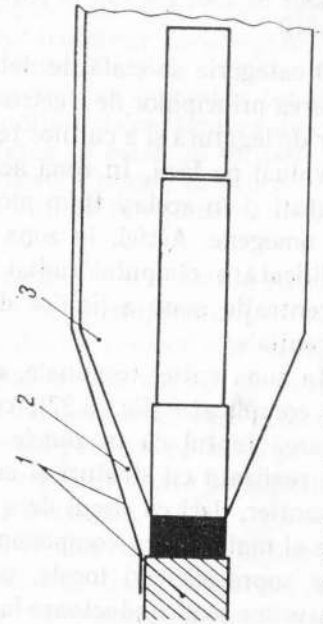


Fig. 5.28. Execuția defectuoasă a straturilor semiconductoare la un manșon de legătură:
1 — ecran de cupru; *2* — strat de aer (în loc de semiconductor); *3* — izolație (bandă).

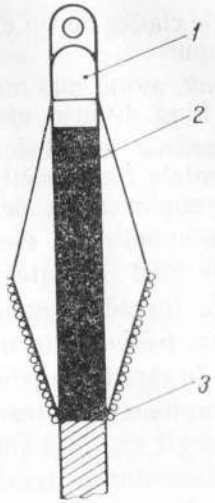


Fig. 5.29. Neîntreruperea în locul potrivit a ecranului exterior la o cutie terminală :
1 — papuc de cablu : *2* — ecran semiconductor (neîntrerupt în locul corect *3*).

5.3. AVARII CARACTERISTICE ALE STAȚIILOR DE TRANSFORMARE ȘI DE CONEXIUNE

Gradul de siguranță al stațiilor de transformare și de conexiune poate fi puternic influențat de trei elemente : calitatea echipamentelor și materialelor utilizate, concepția de asamblare a echipamentelor și materialelor utilizate și personalul care execută montarea, exploatarea sau întreținerea.

Aceste aspecte sînt valabile atît pentru comutația primară, cît și pentru comutația secundară a stațiilor de transformare.

5.3.1. Avarii în comutația primară

Constructiv, elementul esențial care determină dimensiunile unei stații de transformare și de conexiune, în afara numărului de elemente componente, este modul în care se realizează izolația între faze. Stațiile clasice utilizează aerul drept mediu electroizolant. Stațiile moderne utilizează alte medii electroizolante pentru asigurarea distanțelor electrice necesare între faze.

Stațiile de transformare și de conexiune clasice se construiesc fie în exterior (caz preferat din motive economice), fie în interior (caz obligat de arhitectură, poluare, ș.a.).

Stațiile clasice de tip exterior se realizează, pe plan mondial, în următoarele tipuri :

— *înalt*, avînd mai multe planuri de tensiune suprapuse, iar echipamentele fiind dispuse etajat ;

— *semiînalt*, avînd două sau trei planuri de tensiune suprapuse, iar echipamentele fiind montate pe suporți, a căror înălțime nu necesită îngrădiri suplimentare de protecție ;

— *jos*, avînd două sau trei planuri de tensiune suprapuse, iar echipamentele fiind montate pe fundații, la nivelul solului și necesitînd în consecință îngrădiri suplimentare de protecție.

Cel mai frecvent tip utilizat este o combinație între tipul semiînalt și cel jos, în care toate echipamentele se amplasează pe suporți, cu excepția întreruptoarelor și transformatoarelor, care se montează pe fundații.

Și în acest caz însă sînt posibile extinderi de avarii, datorate suprapunerii planurilor de tensiune.

Exemplul 5.1 a. Asfel, într-o stație de transformare de 110 kV (fig. 5.30) în condiții de supratensiuni atmosferice, s-a deteriorat electric și mecanic, un lanț de izolatoare de întindere a legăturilor de supratraversare, în punctul (*SC*).

Conductorul de legătură, ca urmare a ruperii lanțului de izolatoare, a luat forma punctată din figură, căzînd și scurcircuind trifazat sistemul (*B*) de bare. Stația de transformare a rămas nealimentată, ca urmare a funcționării tuturor protecțiilor direcționate înspre locul scurtcircuitului trifazic. Consumatorii au rămas nealimentați timp de 26 min, pînă au fost preluați din alte alimentări de rezervă pe medie tensiune, iar avaria a putut fi lichidată după cîteva ore.

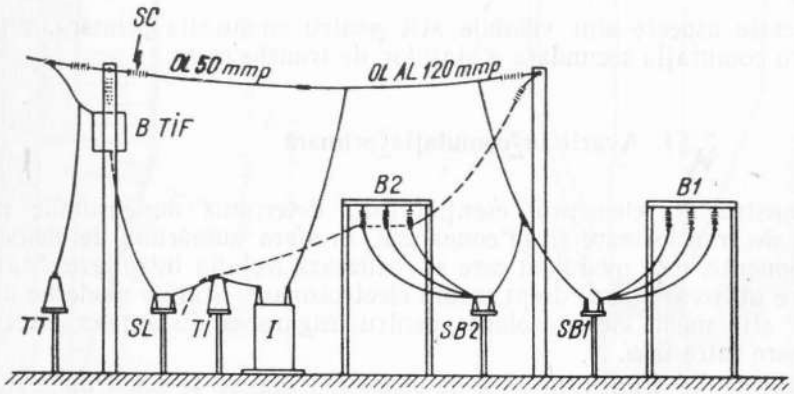


Fig. 5.30. Avarie provocată într-o stație de 110 kV prin căderea unui conductor de supratraversare a unui sistem de bare.

În fig. 5.30 s-a notat cu : *TT* — transformatoarele de tensiune ; *SL* — separatoarele de linii ; *TI* — transformatoarele de curent ; *I* — întreruptorul de 110 kV ; SB_1 și SB_2 — separatoarele de bare spre sistemul *1* respectiv spre sistemul *2* ; B_{TIF} — bobina pentru telefonia de înaltă frecvență.

Stațiile clasice de tip interior se realizează, fie cu întreg echipamentul montat în interior, fie cu transformatoarele montate în exterior iar restul echipamentului în interior [5.9, 5.10 și 5.11].

Avariile care se produc în acest gen de stații, sînt mai grave decît cele produse în instalațiile de tip exterior, prin faptul că arcul electric produs poate conduce la aprinderea elementelor electroizolante, se produce fum și depuneri de funingine pe izolație, accesul este îngreunat, iar lucrările de curățare a izolației prelungesc durata de repunere în funcție a instalațiilor.

Exemplul 5.1 b. Un asemenea caz a avut loc în casa de conexiuni de 6 kV a unei stații de transformare de 110/6 kV. Ca urmare a străpungerii tijei din pertinax de acționare a unui separator, manifestată inițial prin scurtcircuit monofazat și transformat în momentele imediat următoare în scurtcircuit trifazat, care s-a extins pe bare, fumul produs de aprinderea pertinaxului și a vopselelor, a îngreunat, pe deoparte pătrunderea persoanelor în casa de conexiuni, iar pe de altă parte a poluat izolația stației cu funingine, făcînd-o inaptă funcționării și necesitînd curățirea ei. În aceste condiții, o parte din consumatori, care nu au putut fi preluați din alte alimentări de rezervă, nu au putut fi realimentați decît după circa 4 h.

Soluțiile moderne ale stațiilor de transformare și de conexiune sînt concretizate în stațiile de transformare capsulate, avînd drept mediu electroizolant hexaflorura de sulf [5.12 și 5.13].

În prezent s-au realizat asemenea stații pînă la tensiunea de 800 kV. Acest tip de stație poate fi montat în exterior sau în clădire. La cele montate în exterior se dublează garniturile de etanșare între diversele compartimente și se asigură o încălzire locală pentru anotimpul rece, în special la dispozitivele de acționare.

Cele mai frecvente avarii în comutația primară a stațiilor de transformare apar la :

— separatoare, ca urmare a conturnării izolației sau a deficiențelor de îmbinare flanșe-izolator sau din cauza manevrării greșite ;

— întreruptoare, ca urmare a depășirii puterilor de rupere sau a conturnării izolației ;

— taransformatoarele de tensiune și de curent ca urmare a conturnării izolației exterioare sau a defectelor interioare ;

— bobinele de înaltă frecvență, ca urmare a depășirii curenților admiși sau din deficiențe constructive.

Măsurile, care se iau pentru mărirea gradului de siguranță în funcționarea stațiilor, sînt corelate cu elementele economice și sînt dictate de : gradul de seismicitate, condiții atmosferice, poluare industrială sau marină, încadrare în mediul ambiant și stabilitate mecanică și electrică.

Izolația stațiilor de transformare și de conexiune, din punct de vedere constructiv, relevă trei materiale utilizate: izolatoare din porțelan de tip capă-tije, izolatoare din porțelan de tip baston, izolatoarele din sticlă și în ultima vreme izolatoare din elastomeri siliconici cu armătură interioară din fibre tubulare de sticlă, rigidizate cu rășini epoxidice. Ultimul tip de izolatoare prezintă caracteristici electrice și mecanice superioare sticlei și porțelanului, fiind de cinci ori mai ușor decît acestea [5.14 și 5.15].

5.3.2. Avarii în comutația secundară

Avariile caracteristice comutației secundare se pot evidenția prin: funcționarea incorectă sau orientarea eronată a releelor de protecție, sau prin apariția unor circuite false în schemele de protecție.

Exemplul 5.2. Într-o stație de transformare de 220 kV, la un defect apărut pe una din liniile de alimentare, întreruptorul liniei respective nu a declanșat. În consecință au declanșat întreruptoarele tuturor surselor adiacente, stația rămînînd fără tensiune.

Întreruptorul în cauză nu a declanșat deoarece comanda de declanșare dată de protecțiile de distanță și homopolară ale celulei liniei avariate, nu a ajuns la bobina de declanșare a întreruptorului, datorită deteriorării bobinei de tensiune a releului de multiplicare a contactelor contactoarelor separatorului de linie.

Releul de multiplicare s-a adaptat în schemă pentru a evita montarea transformatoarelor de curent și a protecțiilor separate pentru cupla de transfer, funcțiile respective fiind preluate de elementele celulei înlocuite prin cuplă. Releul de multiplicare avea menirea de a urmări poziția separatorului de linie. La poziția închis a separatorului și contactele releului trebuie să fie închise. Prin arderea bobinei de tensiune a releului de multiplicare, însă, s-au creat condiții de nedeclanșare a întreruptorului prin protecție, releul în cauză simulînd poziția deschis a separatorului de linie.

Deteriorarea bobinei de tensiune a releului, s-a datorat calității inferioare a tipului de releu ales, ca și a schemei alese, care nu a asigurat supravegherea stării releului (închis sau deschis).

În practica de verificare pentru puneri în funcțiune a unor instalații noi, ca și în exploatare, au fost depistate și cazuri de formare a unor circuite false. Astfel au apărut circuite false, ca urmare a arderii unei siguranțe în circuitele secundare, sau în alte cazuri au apărut circuite false prin necorelarea poziției de lucru a aparatajului de comutație primară, cu cea gîndită la introducerea unor automatizări (cazul poziției închis sau deschis al separatoarelor).

Măsurile, care se iau pentru creșterea gradului de siguranță în funcționarea circuitelor de comutație secundară, cuprind toată gama, începînd de la furnizor și pînă la concepția de realizare a schemelor.

Importante sînt protecțiile prin relee utilizate în stațiile de transformare și de conexiune pentru protejarea liniilor, a barelor colectoare și a transformatoarelor.

O comparație a protecțiilor utilizate în diferite țări pentru liniile de înaltă și foarte înaltă tensiune este dată în tabelul 5.1 [5.16, 5.17, 5.18, 5.19 și 5.20].

Tabelul 5.1

Protecții prin relee ale liniilor de înaltă și foarte înaltă tensiune, adoptate în diferite țări

ȚARA	Tensiunea de serviciu a liniei, kV	Protecția adoptată	
		de bază	de rezervă
R.S.R.	110—220	distanță	homopolară de curent direcționată
	400	distanță cu legături pe înaltă frecvență	distanță
R.D.G.	220—380	distanță	—
R.F.G.	380	comparativă de fază	distanță
Belgia	380	distanță	distanță
Elveția	110—400	distanță	distanță
Anglia	275—400	diferențială de fază pe înaltă frecvență	distanță
Franța	220—380	distanță	homopolară de putere
Austria	220	distanță	—

O comparație a protecțiilor barelor colectoare ale stațiilor de transformare și de conexiune, adoptate în diferite țări este dată în tabelul 5.2 [5.17, 5.20 și 5.21].

Tabelul 5.2

Protecţii prin relee ale barelor colectoare ale staţiilor de transformare şi de conexiune de înaltă şi foarte înaltă tensiune, adoptate în diferite ţări

ŢARA	Tensiunea de serviciu, kV	Protecţia adoptată
R.S.R.	110—400	diferenţială de curent cu frînare
R.F.G.	380	comparativă direcţionată, cu protecţie de rezervă de declanşare a tuturor întreruptoarelor în caz de refuz al întreruptorului comandat
Belgia	190—380	diferenţială
Franţa	220—380	direcţională cu comanda tuturor întreruptoarelor
Austria	220	diferenţială (numai în cazuri rare)

O comparaţie a protecţiilor adoptate de diferite ţări pentru transformatoarele de putere este redată în tabelul 5.3 [5.16].

Tabelul 5.3

Protecţii ale transformatoarelor de putere de înaltă şi foarte înaltă tensiune adoptate de diverse ţări

ŢARA	Tensiunea de serviciu cea mai înaltă, kV	Protecţia adoptată	
		de bază	de rezervă
R.S.R.	220—400	gaze diferenţială	distanţă max. homopolară direcţionată
U.R.S.S.		gaze diferenţială	distanţă sau maximală de curent
Franţa	380	gaze de cuvă	distanţă numai pe partea de 220 kV

Diferenţierea între diverse ţări, în ceea ce priveşte protecţiile utilizate, nu se referă numai la genurile de protecţii utilizate, ci în cadrul aceluiaşi gen, apar diferenţieri şi în ceea ce priveşte tipul releelor, performanţele acestora, treptele de timp utilizate şi duratele de lucru.

5.4. AVARII CARACTERISTICE ALE TRANSFORMATOARELOR

Dintre cele patru componente principale ale unui transformator (bobinaj, miez magnetic, comutator de ploturi şi cuvă), cele mai dese deteriorări apar la bobinaje.

5.4.1. Avarii la bobinaje

Avariile bobinajelor se manifestă fie din cauze electrice, fie din cauze mecanice.

Din punct de vedere electric bobinajul unui transformator poate fi supus în timpul exploatării fie unor supratensiuni, fie unor suprasarcini.

La supratensiuni [5.22] bobinajul unui transformator (fig. 5.31) poate ceda longitudinal (axial) pe direcţia (L) sau transversal (radial) pe direcţia (T_1) sau (T_2). Supratensiunile conduc la străpungerea izolaţiei între spirele aceleiaşi faze sau între două înfăşurări vecine sau între o înfăşurare şi masă, cauzele fiind :

— slăbirea izolaţiei prin îmbătrînire ;

— depăşirea diferenţei de potenţial luate în considerare la dimensionarea izolaţiei ;

— degradarea izolaţiei, ca urmare a unor bavuri existente în conductorul de cupru şi nedepistate la izolare.

La suprasarcini bobinajul unui transformator se comportă în general bine, atîta timp cît valoarea acestora nu depăşeşte curentul nominal pe o durată care ar putea conduce la încălziri excesive. În timp însă izolaţia bobinajelor se degradează prin îmbătrînire.

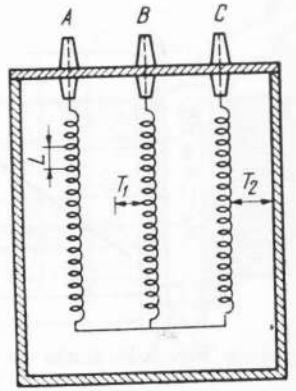


Fig. 5.31. Străpungeri (L) longitudinale (axiale) şi transversale (radiale) (T_1 şi T_2) la un bobinaj primar sau secundar de transformator.

Experienţele au demonstrat [5.23] că uzura (V) a unei izolaţii se poate produce la început uniform (fig. 5.32) ajungînd în timpul (Z) la o valoare de cca. 80—85%, după care creşterea uzurii se încetineşte. Izolaţia însă şi-a pierdut elasticitatea, devine sfărîmicioasă şi se deteriorează la vibraţiile transformatorului. Cu cît suprasarcinile la care a fost expus transformatorul respectiv sînt de durate mai mari, cu atît durata Z va fi mai scurtă.

Suprasarcini de valori mari (scurtcircuitele) pot provoca deteriorarea transformatoarelor ca urmare a efectelor electrodinamice care au loc, bobinajele deformîndu-se şi cedînd mecanic.

Oricare ar fi însă fenomenul care a condus la avarierea unui transformator, cauzele efective pot fi [5.24] de proiectare sau concepţie, de tehnologie aplicată în execuţie şi de exploatare.

Erorile de proiectare pot proveni din izolaţia insuficientă a spirelor, condiţie în care la supratensiuni atmosferice sau de comutaţie pot apărea străpungeri ale izolaţiei, în cele mai dese cazuri longitudinal. Erorile de tehnologie în construcţie se datorează în special utilizării unui cupru cu bavuri, unor suduri necorespunzătoare, unor deficienţe de împachetare a tolelor, sau de consolidare a bobinajelor. Erorile de exploatare provin din neurmărirea regimului de exploatare a transformatorului (suprasarcini, profilaxie, depuneri de sedimente de ulei pe bobinaj, deficienţe de circulaţie a uleiului, ş.a.).

Un caz special îl prezintă transformatoarele cu *izolaţie degresivă*. În aceste condiţii trebuie luate măsuri de evitare a supratensiunilor prin montare de descărcătoare la bornele transformatorului.

Se dau în continuare cîteva cazuri caracteristice de avarieri ale bobinajelor transformatoarelor.

Exemplul 5.3. Un transformator de 40 MVA 110/35/10 kV funcţionînd timp relativ lung la un curent de scurtcircuit produs în apropiere, ca urmare a funcţionării incorecte a protecţiei maximale rapide şi avînd totodată o consolidare insuficientă a bobinajelor, s-a deteriorat, prin deformarea şi străpungerea bobinelor fazei C.

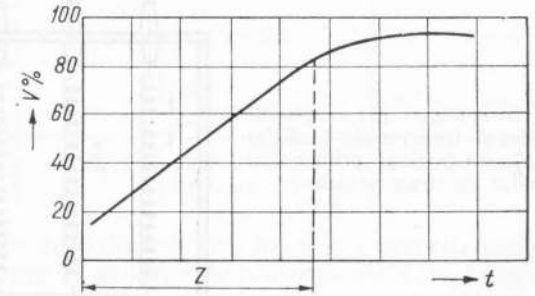


Fig. 5.32. Curba de uzură relativă a transformatoarelor.

Transformatorul a fost reparat prin înlocuirea bobinajului defect şi modificarea sistemului de consolidare a bobinajelor.

Exemplul 5.4. În alt transformator de 20 MVA 110/35/6 kV, ca urmare a unor eforturi electrodinamice date de un scurtcircuit pe barele de 35 kV ale staţiei (scurtcircuit eliminat selectiv de protecţie), a suferit deformări radiale ale bobinajului. Acest gen de deteriorare este caracteristic transformatoarelor cu trei înfăşurări, la care în general reactanţa înfăşurării de medie tensiune este mai mică decît a celorlalte două.

Transformatorul a fost reparat prin înlocuirea porţiunii de bobinaj afectată, reizolarea întregului bobinaj şi anularea comutatorului de reglaj fără tensiune a înfăşurării de medie tensiune.

Exemplul 5.5. Un al treilea caz de avariere şi incendiere a unui transformator de 31,5 MVA 110/35/6 kV a avut loc în condiţiile unei îmbătrîniri premature a izolaţiei. transformatorul funcţionînd timp îndelungat aproape de valoarea sarcinii nominale.

În afara avariilor de bobinaj, pentru circuitul electric al transformatoarelor sînt caracteristice şi defectele de izolatoare, cauzele fiind în principal aceleaşi (proiectare, execuţie sau exploatare).

5.4.2. Avarii la miezul magnetic

La miezul magnetic se pot produce avarii în principal din motive constructive.

Defecţiunile cele mai frecvente apar la :

— buloanele de strîngere ale tolelor, prin străpungerea tubului electroizolant, sau chiar prin ruperea buloanelor ;

— coloanele miezului magnetic, prin deplasarea acestora şi crearea de interstiţii ;

— conductoarele de legare la pămînt, prin arderea acestora.

În principiu tolele (1) sînt rigidizate cu ajutorul buloanelor (2) — fig. 5.33. În condiţiile în care tuburile electroizolante (3) străpung în

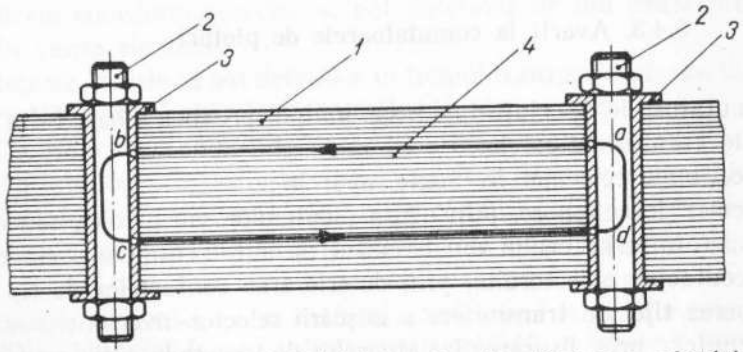


Fig. 5.33. Deteriorarea izolaţiei buloanelor de strîngere a miezului magnetic şi formarea curenţilor de circulaţie.

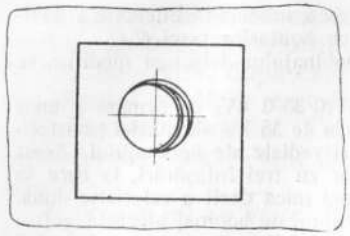


Fig. 5.34. Gaură deformată, datorită împachetării necorespunzătoare a tolelor.

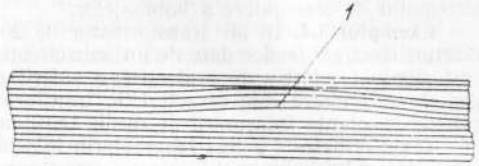


Fig. 5.35. Întrefier creat în miezul magnetic ca urmare a împachetării necorespunzătoare a tolelor.

punctele *a*, *b*, *c* și *d*, se formează un curent de circulație (*4*), care parcurge pachetul de tole și buloanele și încălzindu-le, se produce întîi modificarea zgomotului caractristic al transformatorului și în final scoaterea lui din funcțiune.

Exemplul 5.6. Un transformator de 20 MVA, 110/35/6 kV, ca urmare a ștanțării necorespunzătoare a dimensiunii găurilor pentru buloane și a împachetării incoreete a tolelor, s-a avariat în timpul exploatării (fig. 5.34). Repararea lui a constat din curățarea izolației tolelor și reizolarea acestora, din reștanțarea corespunzătoare a găurilor pentru buloane și reîmpachetarea și strîngerea tolelor.

Exemplul 5.7. Un alt transformator de 20 MVA de 110/35/6 kV s-a avariat ca urmare a împachetării defectuoase a miezului magnetic și a consolidării insuficiente a coloanelor (fig. 5.35) acestea au provocat deplasarea coloanelor și crearea unui întrefier (*1*) de pînă la 10 mm. Și în acest caz, s-au reștanțat găurile pentru buloane, s-a refăcut izolația tolelor și s-au împachetat tolele astfel încît să nu mai existe întrefieruri.

5.4.3. Avarii la comutatoarele de ploturi

Comutatoarele de ploturi sub sarcină pot provoca scoateri din funcțiune ale transformatoarelor.

Defecțiunile cele mai frecvente apar la :

— cutia de acționare, prin uzura pieptenilor sau a rolei, sau defectarea microîntreruptorului din circuitul de automenținere a comenzii ;

— contactele selectorului, prin deteriorarea contactelor de tip taler sau ruperea tijei de transmitere a mișcării selector-inversor ;

— ruptor, prin fisurarea izolatoarelor de trecere la cutia ruptorului, datorită eforturilor ce apar la comutare, sau prin ovalizarea rolei de pre-

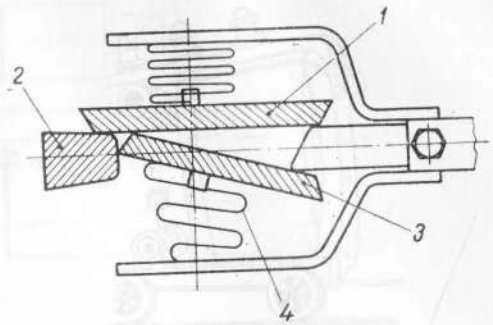


Fig. 5.36. Defectarea unui comutator de ploturi sub sarcină.

contact în timpul comutării, sau prin străpungerea izolației la barele de legătură ale ruptorului.

Exemplul 5.8. Astfel, la un comutator de ploturi sub sarcină, (fig. 5.36) montat la un transformator de 25 MVA, 110/22/6 kV, în timpul manevrării, talerul superior (*1*) a călcat bine peste contactul fix (*2*), în timp ce talerul inferior (*3*) a scăpat pe lîngă contactul fix, ca urmare și a acțiunii arcului (*4*). Aceasta a fost posibil deoarece nu i s-a asigurat contactului fix (*2*), conicitatea și lungimea necesară.

Defectul a fost remediat prin înlocuirea contactului fix și a talerelor.

Exemplul 5.9. O altă avarie a apărut la un comutator de ploturi sub sarcină al unui transformator de 16 MVA, 110/22/6 kV, comutatorul avînd ruptoarele montate într-un izolator și o cutie exterioară transformatorului. Avaria a produs explozia izolatorului și incendierea transformatorului.

5.4.4. Avarii la cuve

Cuvele transformatoarelor se pot deteriora fie din cauze mecanice, fie din cauze electrice.

Mecanic, cuvele se pot deteriora în timpul transportului, sau în timpul funcționării, prin îmbătrînirea garniturilor de cauciuc.

Electric, cuvele se pot deteriora ca urmare a unei degajări bruște de gaze în interior, provocată la rîndul său de o avariere a bobinajului sau a comutatorului de ploturi. În aceste condiții pot apare suprapresiuni importante, care pot conduce la deformarea cuvelor și chiar la ruperea lor.

Exemplul 5.10. O astfel de avarie (fig. 5.37) a avut loc la un transformator de 31,5 MVA 110/5,5 kV, la care cusătura cuvei a cedat (*1*), ca urmare a suprapresiunii interne, de-a lungul unei cusături prin sudură a cuvei.

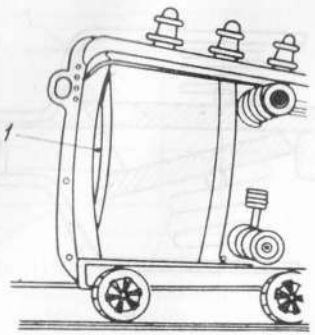


Fig. 5.37. Explozia unei cuve de transformator.

5.5. AVARII CARACTERISTICE ALE GENERATOARELOR

Între cele patru părţi componente principale ale generatoarelor : fundaţie, carcasă, stator şi rotor, cele mai frecvente avarii apar la rotor şi la stator.

Statistici efectuate în unele ţări arată că avariile la rotor sînt aproape de două ori mai numeroase decît cele din stator [5.25].

5.5.1. Avarii la fundaţii

Avariile la fundaţii, sînt foarte rare şi îmbracă aspectul de ansamblu al turbogeneratorului, fundaţia fiind comună. Au apărut cazuri în care fundaţia s-a trasat neuniform.

Exemplul 5.11. Un caz interesant de intrare în vibraţie a avut loc la un turbogenerator, de 5,4 MW după cca. 24 ani de funcţionare.

Acest turbogenerator la pornire după reparaţie a prezentat vibraţii foarte puternice, cînd atingea turaţia de 2 700—2 800 rot/min. S-a considerat că acestea provin de la capele generatorului, care fuseseră deschise şi apoi fretate cu ocazia reparaţiei. S-a verificat echilibrarea rotorului şi s-a repornit grupul care însă a prezentat din nou vibraţii puternice în jurul aceleiaşi turaţii.

S-au pornit atunci separat turbina şi separat generatorul, ele rotindu-se în condiţii perfecte pînă la 3 300 rot/min. În momentul cuplării lor însă fenomenul de vibraţie s-a repetat.

S-a luat atunci în analiză fundaţia turbogeneratorului, studiind şi datele iniţiale de construcţie. Efectuîndu-se foraje în jurul fundaţiei (fig. 5.38) s-a constatat că nivelul apelor freatice (*1*) varia foarte puternic în timp, trăgîndu-se de aici concluzia că piloţii din lemn (*2*) care fac parte componentă din fundaţie (*3*) au putrezit urmare a unor umeziri şi uscări repetate.

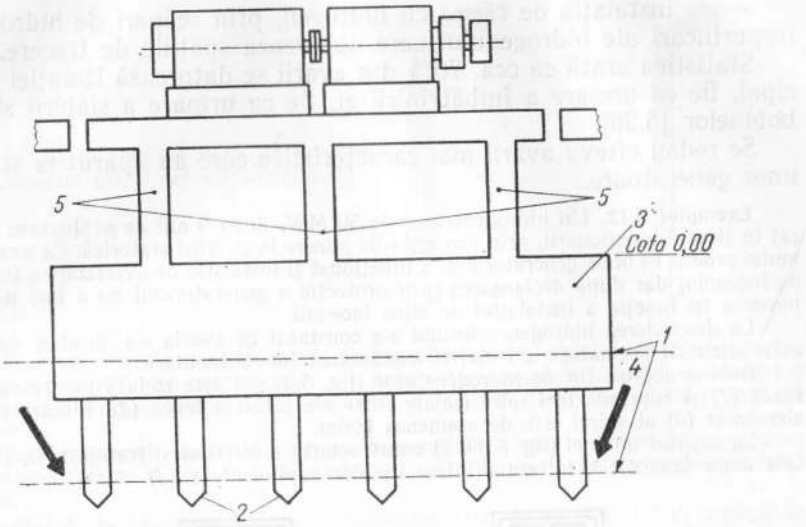


Fig. 5.38. Avaria unei fundaţii de turbogenerator.

În aceste condiţii, solul fiind cu pietriş, s-au efectuat injecţii cu beton sub presiune (*4*) şi în jurul fundaţiei, iar picioarele exterioare (*5*) ale fundaţiei au fost întărite cu profile corniere, montate pe colţurile picioarelor şi rigidizate între ele, pe fiecare picior în parte.

Astfel a fost eliminată vibraţia turbogeneratorului.

5.5.2. Avarii la carcase

Avariile la carcasa generatorului pot proveni în cazuri rare şi din deficienţe ale carcasei. În general însă carcasele sînt victimele deficienţelor care au apărut în rotor sau în lagărele acestuia.

5.5.3. Avarii la statoare

Avariile la statorul generatorului se localizează în general la următoarele elemente constructive :

— la bobinajul statorului, în partea activă din ancoşe, la capetele frontale, la sistemul de consolidare, sau la izolatoarele de trecere ;

— la miezul magnetic, cauzele principale fiind : încălzirile locale (între tole), slăbirea strîngerii miezului, ruperi de tole la dinţii crestăturilor, fisurarea buloanelor de strîngere, sau ruperi ale elementelor de suspensie elastică între carcasă şi miez ;

— la instalația de răcire cu hidrogen, prin scăpări de hidrogen sau impurificări ale hidrogenului care obturează spațiile de trecere.

Statistica arată că cca. 70% din avarii se datorează izolației în principal, fie ca urmare a îmbătrînirii ei, fie ca urmare a slăbirii strîngerii bobinelor [5.26].

Se redau cîteva avarii mai caracteristice care au apărut la statoarele unor generatoare.

Exemplul 5.12. Un hidrogenerator de 50 MW, după 9 ani de exploatare a declanșat în timpul funcționării, prin protecția de punere la pămînt statorică. Ca urmare a fumului produs în boxa generatorului, a funcționat și instalația de avertizare a începutului de incendiu, dar după declanșarea prin protecție a generatorului nu a fost necesară și punerea în funcție a instalației de stins incendii.

La deschiderea hidrogeneratorului s-a constatat că avaria s-a produs, ca urmare a îmbătrînirii premature a izolației conductoarelor elementare.

Bobina acestui tip de hidrogenerator (fig. 5.39, *a*) este izolată pe traseu printr-o teacă (*1*) și cuprinde trei spire izolate între ele printr-o teacă (*2*). Fiecare conductor elementar (*3*) al spirei este de asemenea izolat.

La capătul bobinei (fig. 5.39, *b*) constructorul a efectuat și transpoziția, împărțind cele două fascicole rezultate printr-o izolație suplimentară (*4*).

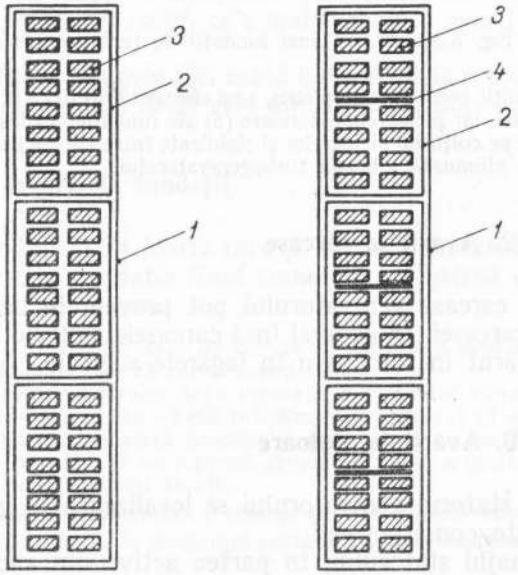


Fig. 5.39. Dispoziția conductoarelor elementare ale bobinajului generatorului de 50 MW, pe traseu (*a*) și la capătul bobinajului (*b*) unde s-a executat transpoziția.

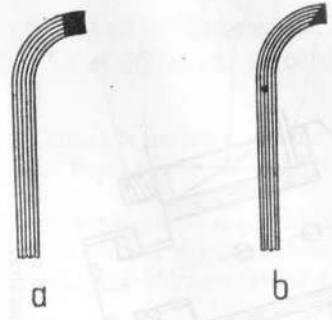


Fig. 5.40. Capete de bară lipite corespunzător (*a*); necorespunzător (*b*).

Avaria a avut loc în acest punct de transpoziție, unde tensiunile suplimentare induse (și deci curenții) sînt maxime. Aici s-a produs străpungerea izolației, ca urmare a solicitărilor din timpul funcționării, ceea ce a condus la îmbătrînirea prematură a izolației.

S-a luat ca măsură, pentru micșorarea tensiunilor induse, ca transpoziția conductoarelor elementare să se efectueze nu numai la capătul bobinei, ci și în secțiunea activă a acesteia.

Exemplul 5.13. O altă avarie, la un hidrogenerator de 23 MW, tot la capătul de bare, a avut loc din motive de lipire necorespunzătoare din construcție a capetelor respective (fig. 5.40).

În mod normal capetele de bară se lipesc între ele cu aliaj de adaos pe o suprafață suficient de mare, care să asigure contactul (fig. 5.40, *a*) și apoi se strîng cu o mufă de legătură de asemenea umplută cu material de adaos. S-a constatat însă că la capătul de bare, lipitura s-a efectuat numai pe cca 10% din suprafața necesară (fig. 5.40, *b*), astfel încît contactul electric s-a realizat practic numai prin strîngerea mufei. Acest fapt a provocat arc electric local și de aici avarierea capătului de bobinaj și scoaterea din funcțiune a generatorului.

5.5.4. Avarii la rotoare

Statisticile efectuate arată că avariile rotoarelor generatoarelor se localizează cca 70% la partea electrică și cca 30% la partea mecanică a acestora.

Se redau în continuare cîteva cazuri de avarieri la diferite elemente ale rotorului.

Fisurarea dinților rotorului în zona de așezare a capelor a apărut la rotoarele anumitor tipuri de turbogeneratoare, la care momentul de inerție este diferit pe cele două diametre perpendiculare. Ca urmare, solicitările alternative produse, au supus la oboseală dinții mari ai rotorului, producînd fisurarea sau ruperea în zona (*1*) (fig. 5.41). Același fenomen, poate produce și fisurarea sau ruperea inelelor de centrare (fig. 5.42) în zonele (*1*) și (*2*) ale acestora.

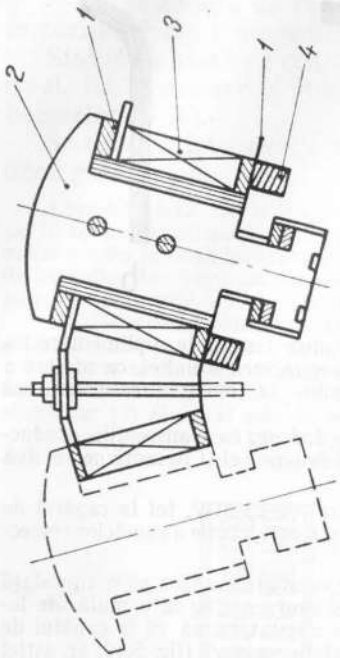


Fig. 5.43. Stabilirea fixării polilor pe roata polară la un rotor de hidrogenerator.

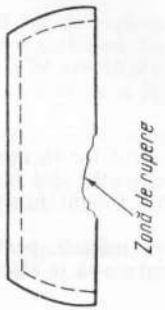


Fig. 5.44. Ruperea unei părți de capă în zona de fretare.

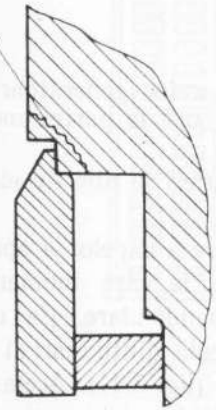


Fig. 5.41. Avarierea dinților mari ai unui rotor de turbogenerator.

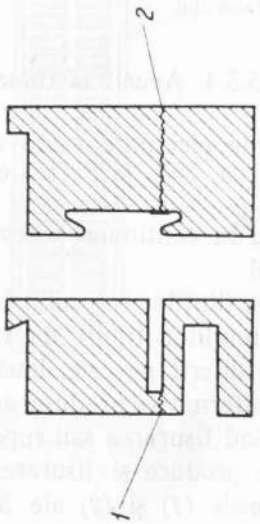


Fig. 5.42. Avarierea inelelor de centrare ale unui rotor de turbogenerator.

În primul caz remedierea este mult mai dificilă, fiind necesară prelucrarea unei noi zone de fretare a capelor. În al doilea caz se confecționează perechi noi de inele.

Exemplul 5.14. Slăbirea fixării polilor pe roata polară la un hidrogenerator cu poli aparenți, poate avea loc în condițiile în care penele de fixare (*1*) din fig. 5.43 nu au fost corect ajustate.

În timpul funcționării, s-a produs tasarea penelor, bobinajul (*3*) al polului cu coada în T (*2*) a început să se miște și arcul (*4*) nu a putut influența strîngerea bobinajului. Jocul bobinelor a produs vibrații anormale în funcționarea hidrogeneratorului care a fost oprit pentru remediere.

Fisurarea sau chiar explozia capelor este posibilă, fie ca urmare a unor defecțiuni inițiale de fabricație, fie a unui fretaj necorespunzător.

Exemplul 5.15. La capa unui rotor de generator de 50 MW a apărut o rupere a capei de genul celei prezentate în fig. 5.44. Ruperea capei s-a datorat defecțiunilor de fabricație. Bucățile rupte din capă au deteriorat în continuare bobinajul rotoric și statoric.

La excitația generatorului, fenomenul cel mai frecvent care apare sînt scînteile produse între periile colectoare și rotor. Acestea se pot datora, fie unei uzuri înaintate a periilor, fie unei neșlefuiri corespunzătoare a lamelelor rotorului la suprafața de contact cu periile colectoare.

Lagărele generatoarelor de curent alternativ pot fi afectate ca urmare a apariției unei tensiuni electrice, tensiune care, în condițiile în care lagărul respectiv nu este izolat, dă naștere unui curent care perlează cuzinetii lagărului și fusurile rotorului.

Tensiunea indusă are valori de ordinul voltilor, dar curentul poate ajunge, funcție de puterea generatorului, la ordinul zecilor și chiar sutelor de amperi. La un lagăr cu izolația deteriorată, pelicula de ulei este străpunsă de diferența de potențial, curentul, închizîndu-se prin arborele rotorului, cuzinetii lagărului din zona excitatricei, placa de fundație și cuzinetii lagărului dinspre turbină. Izolarea se efectuează cu o placă izolantă din pertinax cu o grosime de 2 pînă la 6 mm, montată între lagărul dinspre excitatrice și placa de fundație.

În exploatare apar destul de frecvent cazuri de punere la pămînt simplă și în unele cazuri chiar dublă a circuitului rotoric.

Dacă primul caz este în general numai semnalizat prin instalații speciale, pentru cel de al doilea caz se montează protecții speciale de declanșare automată.

5.6. AVARII CARACTERISTICE ALE SISTEMULUI ENERGETIC

5.6.1. Stările sistemului energetic

Un sistem energetic se poate găsi, din punct de vedere funcțional, în una din următoarele stări (fig. 5.45) : exploatare normală, alarmă, avarie și restabilire [5.27].

În starea de exploatare normală accentul principal se pune pe funcționarea economică a sistemului, în scheme de funcționare capabile să facă față cu succes unei eventuale treceri la starea de avarie.

În starea de alarmă, dacă se detectează posibilitatea unei avarii de sistem, se iau măsuri de prevenire (de ex. la căderea unui grup generator mare, se pornesc alte grupuri aflate în rezervă).

În starea de avarie, sistemul trebuie să fie astfel pregătit încît să aibă o rezervă suficientă de stabilitate dinamică și statică și să facă față cu succes fenomenelor care apar.

În starea de restabilire, se iau măsuri de readucere rapidă a sistemului, la parametrii de funcționare cît mai apropiați de cei inițiali.

În multe cazuri, un incident primar este urmat de incidente asociate. Corespunzător stărilor posibile ale sistemului energetic, desfășurarea evenimentelor caracteristice poate fi înscrisă în unul din circuitele indicate în fig. 5.46.

Incidentul primar poate fi cu atît mai grav pentru ansamblul sistemului, cu cît el va avea loc într-un element mai important și cu cît sistemul va avea rezerve mai mici pentru revenirea la starea inițială.

Incidentele asociate (în cascadă) sînt consecințe directe sau indirecte ale incidentului primar. Ele amplifică efectele incidentului primar.

Solicitarea maximă a sistemului la stabilitate dinamică și statică poate avea una din următoarele două consecințe : fie sistemul a avut rezerve suficiente de stabilitate dinamică și statică și se menține după separarea elementelor defecte, fie nu a avut rezerve suficiente și sistemul s-a rupt în insule.

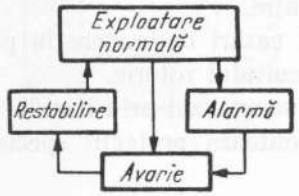


Fig. 5.45. Stările posibile ale unui sistem energetic.

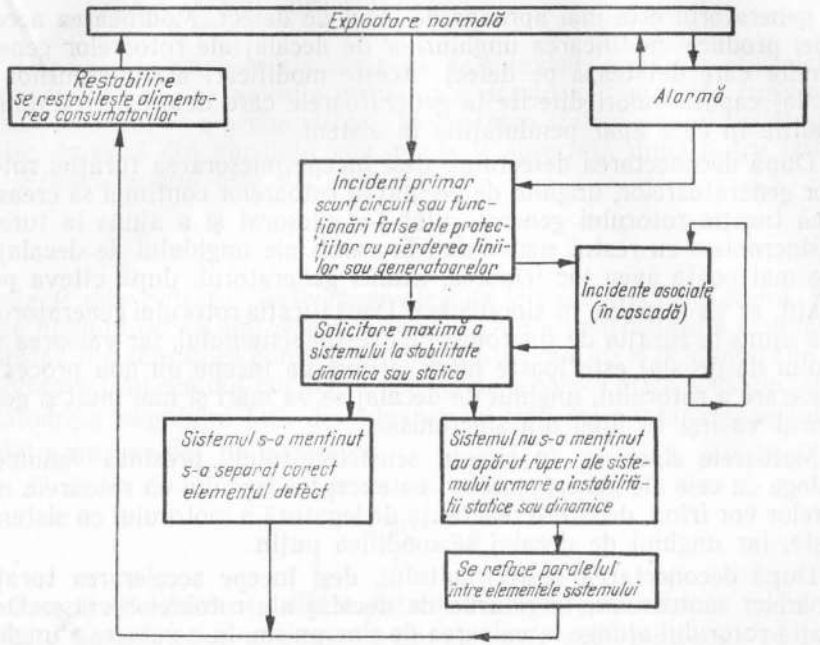


Fig. 5.46. Desfășurarea evenimentelor caracteristice ale avariilor în sistem.

Apar deci ca importante pentru sistemul energetic, sub aspectul prevenirii și limitării avariilor, rezervele de stabilitate dinamică și statică, de care dispune.

5.6.2. Stabilitatea dinamică

Capacitatea unui sistem energetic de a asigura, după aplicarea unei variații bruște și instantanee, un nou regim de funcționare, în care parametrii în nodurile importante să fie cît mai apropiați de cei avuți anterior, reprezintă rezerva de stabilitate dinamică a acelui sistem [5.28].

La apariția unui scurtcircuit într-un punct al sistemului, elementele cele mai importante care influențează asupra stabilității dinamice a sistemului sînt : grupurile generatoare sincrone, motoarele sincrone sau asincrone de acționare a mașinilor unelte și valoarea reactanței care se interpune între locul de defect și acestea.

Generatoarele sincrone, în primul moment al scurtcircuitului, au tendința de accelerare a turației. Accelerarea este cu atît mai mare cu

cît generatorul este mai aproape de locul de defect. Modificarea acceleraţiei produce modificarea unghiurilor de decalaj ale rotoarelor generatoarelor care debitează pe defect. Aceste modificări ale unghiurilor de decalaj capătă valori diferite la generatoarele care debitează pe defect, condiţie în care apar pendulaţiile în sistem.

După deconectarea defectului, deşi începe micşorarea turaţiei rotoarelor generatoarelor, unghiul de decalaj al rotoarelor continuă să crească. Dacă turaţia rotorului generatorului s-a micşorat şi a ajuns la turaţia de sincronism cu restul sistemului, la valori ale unghiului de decalaj la care mai poate avea loc frînarea, atunci generatorul, după cîteva pendulaţii, se va menţine în sincronism. Dacă turaţia rotorului generatorului nu a ajuns la turaţia de sincronism cu restul sistemului, iar valoarea unghiului de decalaj este foarte mare, atunci va începe un nou proces de accelerare a rotorului, unghiul de decalaj se va mări şi mai mult şi generatorul va ieşi în final din sincronism.

Motoarele sincrone, în timpul scurtcircuitului, prezintă fenomene analoge cu cele ale generatoarelor, cu excepţia faptului că rotoarele motoarelor vor frîna, deoarece reactanţa de legătură a motorului cu sistemul creşte, iar unghiul de decalaj se modifică puţin.

După deconectarea scurtcircuitului, deşi începe accelerarea turaţiei rotoarelor motoarelor, unghiurile de decalaj ale rotoarelor cresc. Dacă turaţia rotorului ajunge la valoarea de sincronism, la o valoare a unghiului de decalaj, la care mai poate avea loc accelerarea rotorului, atunci motorul sincron se va menţine în sincronism. Dacă turaţia rotorului nu reuşeşte să ajungă la valoarea de sincronism, iar unghiul de decalaj a atins o valoare mare, motorul va ieşi din sincronism.

La motoarele asincrone, în primul moment al scurtcircuitului, scade turaţia şi creşte alunecarea, odată cu scăderea tensiunii şi cu scăderea cuplurilor electromagnetice. La scurtcircuit prelungit, alunecarea poate depăşi valoarea critică, ceea ce va scădea şi mai mult turaţia rotoarelor. Frînarea rotoarelor va fi cu atît mai mare, cu cît distanţele electrice pînă la locul scurtcircuitului, vor fi mai mici.

După deconectarea scurtcircuitului, fenomenele, care au loc în motoarele asincrone, depind foarte mult de valorile atinse ale tensiunii şi alunecării. Astfel dacă la o valoare foarte scăzută a tensiunii, alunecarea începe să scadă, atunci motorul va rămîne în funcţiune. Dacă însă la o valoare foarte scăzută a tensiunii, alunecarea continuă să crească, atunci motorul va consuma energie reactivă suplimentară, ceea ce va conduce la scăderea suplimentară a tensiunii. Ducă pe ansamblul sistemului energetic, la majoritatea motoarelor asincrone alunecarea va începe să scadă, stabilitatea dinamică a sistemului se menţine. În caz contrar, stabilitatea dinamică a sistemului se pierde.

5.6.3. Stabilitatea statică

Capacitatea unui sistem energetic de a reveni, după variaţii mici ale parametrilor săi, la valorile iniţiale ale acestora, reprezintă rezerva de stabilitate statică a acelui sistem. Stabilitatea statică a unui sistem energetic, în unul din punctele sale, poate fi apreciată după patru criterii.

Primul criteriu este dat de expresia

$$\frac{dP}{d\delta} > 0 \qquad (5.1)$$

unde P este puterea electromagnetică de frînare a generatorului, iar δ este unghiul de decalaj al generatorului (sau a generatorului echivalent) considerînd tensiunea constantă. Stabilitatea statică a generatorului este asigurată prin semnul pozitiv al derivatei, deoarece orice variaţie întîmplătoare a unghiului faţă de valoarea lui iniţială, poate fi suportată şi înlăturată imediat de generator.

Al doilea criteriu este concretizat prin expresia

$$\frac{dQ}{dU} < 0 \qquad (5.2)$$

în care Q este diferenţa dintre puterea reactivă care intră în nodul analizat şi puterea reactivă care iese din el, iar U este tensiunea în nodul considerat.

Stabilitatea statică a nodului de sistem luat în considerare, este asigurată prin semnul negativ al derivatei, deoarece aceasta caracterizează valoarea sarcinii reactive suplimentare, care provoacă scăderea tensiunii. Cu cît valoarea absolută a derivatei este mai mare, cu atît tensiunea va fi mai stabilă.

Al treilea criteriu este definit de expresia :

$$\frac{dPs}{ds} > 0 \qquad (5.3)$$

unde P_s este diferenţa între puterea electromagnetică de rotaţie la arborele motorului asincron (sau a motorului asincron echivalent) şi puterea de frînare a maşinii unelte antrenate, iar s este alunecarea, considerînd tensiunea constantă. Stabilitatea statică a nodului de sistem luat în considerare este asigurată prin semnul pozitiv al acestei derivate, condiţie în care puterea electromagnetică de rotaţie la arborele motorului, creşte mai repede decît cuplul de frînare, simultan cu creşterea alunecării.

Al patrulea criteriu este dat de raportul

$$\frac{dP}{df} < 0 \qquad (5.4)$$

în care P este diferența între puterea activă care intră în nodul de sistem considerat și cea care iese, iar f este frecvența.

Stabilitatea statică a sistemului în nodul considerat este asigurată prin semnul negativ al acestei derivate, regimul fiind stabil dacă sarcinile active suplimentare cerute de consumatori nu cresc mai repede decît scade frecvența și invers.

Din cele patru criterii rezultă importanța pe care o prezintă pentru stabilitatea statică, în special variația frecvenței și a tensiunii. Din acest motiv, limitele de variație admise ale frecvenței și tensiunii sînt stabilite prin acte normative, sau convenții internaționale. În R.S.R, în prezent variația de frecvență admisă, nepenalizabilă, stabilită prin Convenția Internațională a țărilor membre CAER este între 49,8 și 50,05 Hz, iar prima tranșe de sacrificiu automat este reglată la 48,7 Hz.

Tot în R.S.R., variațiile admise de tensiune sînt stabilite prin act normativ [5.29], care prevede de exemplu pentru rețelele de 110 și 220 kV abateri admisibile de $\pm$ 10% Un.

În unele țări s-a normat și rezerva de stabilitate statică. De exemplu în U.R.S.S. rezerva de stabilitate statică în sistemul de 400 kV trebuie să fie de 15% pentru starea de exploatare normală și de 5% pentru starea de restabilire.

5.6.4. Avarii ale sistemelor energetice

Avariile sistemelor energetice ale diferitelor țări au constituit obiectul unor ample analize efectuate de specialiști, în scopul stabilirii măsurilor de luat pentru ridicarea gradului de siguranță în funcționare și continuitate în alimentarea consumatorilor [5.30 și 5.31].

În cele ce urmează se descriu cîteva din avariile mai caracteristice.

Exemplul 5.16. În anul 1960, în America de Nord, a avut loc o avarie de sistem, în condițiile în care o linie de 345 kV era retrasă din exploatare pentru execuția unor lucrări noi. În același timp trebuia pusă în funcțiune o linie nouă de 115 kV, în care scop s-a făcut o instalație provizorie. La un defect pe linia de 115 kV, întreruptorul de 115 kV montat provizoriu, a declanșat (la 0,4 s). Scurtcircuitul prelungit a făcut ca o centrală încărcată la 334 MW să declanșeze în perioada regimului tranzitoriu. Suprasarcina rezultată a condus la declanșarea a două linii de 115 kV. Pierderea acestor căi de transport a produs o instabilitate dinamică și separarea sistemului în insule. În una din insule, unde frecvența a scăzut cu 3,0%, au acționat dispozitivele de descărcare automată a

sarcinii, sacrificînd în două tranșe o parte din consumatori, făcînd astfel posibilă revenirea la frecvență normală, resincronizarea instalațiilor și realimentarea consumatorilor în 5 min.

Exemplul 5.17. În anul 1960, în America de Nord, în schemă normală de funcționare a sistemului, cu o rezervă turnantă de 450 MW (6%), un grup generator care debita 350 MW a declanșat din cauza unui defect apărut în circuitele secundare ale întreruptorului. Declanșînd grupul generator, în continuare a funcționat eronat și protecția cazanului, care a dat impuls de stingere a flăcării. Prin aceasta însă a fost scos din funcție și cel de-al doilea grup generator, care se alimenta cu abur din același cazan. Frecvența a scăzut cu 1,3%, au intrat în funcție dispozitivele de descărcare automată a sarcinii, dar sacrificiile efetuate au fost insuficiente și frecvența a rămas în continuare scăzută. Atunci s-a trecut la efectuarea de sacrificii manuale, ridicîndu-se frecvența. S-au repornit instalațiile din centrala electrică și după 30 min de la producerea avariei s-au realimentat consumatorii.

Exemplul 5.18. În anul 1965, în America de Nord, două uragane au rupt în două sistemul energetic, prin scoaterea din funcțiune a 7 linii de 345 kV și 13 linii de 138 kV. În zona deficitară din punctul de vedere al echilibrului energetic, consumatorii au rămas nealimentați mai multe zile, pînă la refacerea liniilor avariate. În cazul acestor avarii nu au apărut fenomene de instabilitate dinamică și de declanșări în cascadă.

Exemplul 5.19. Tot în anul 1965, în luna noiembrie, la orele de vîrf de sarcină, a avut loc una din cele mai mari avarii din sistemele interconectate S.U.A. — Canada. Întreruperea, care a durat în diferite zone de la trei minute pînă la mai multe ore, a afectat alimentarea cu energie electrică a cca 30 milioane de locuitori, pe o suprafață de 200 000 km².

Avaria a pornit de la declanșarea uneia din cele 5 linii aeriene de 230 kV care leagă CHE Adam Beck, cu zona Toronto. Fluxul de energie electrică repartizat pe celelalte 4 linii a depășit valorile de reglaj ale protecțiilor, provocînd și declanșarea acestor linii. În consecință, puterea electrică disponibilă, nemaiavînd căi de evacuare spre Nord (Toronto), a fost dirijat spre Sud, ceea ce a condus la depășirea valorilor reglate ale protecțiilor liniilor dinspre zona New-York, care de asemenea au declanșat. Grupurile din centralele hidroelectrice descărcîndu-se puternic, s-au supraturat, a crescut frecvența în toată zona și au declanșat turbogeneratoarele centralelor termoelectrice din zonă.

Comisia federală numită pentru analiza acestei avarii a constatat că avaria a fost provocată de funcționarea incorectă a unui releu al protecției de distanță și s-a extins, pe de o parte ca urmare a stabilirii unor reglaje ale protecțiilor mult mai joase decît capacitatea de transport a liniilor, iar pe de altă parte ca urmare a funcționării defectuoase a unor regulatoare de turație ale turbinelor hidroelectrice. Acestea au încercat să închidă admisia de apă în turbine, dar s-au golit rezervoarele de ulei ale sistemului hidraulic și scăzînd presiunea de ulei, nu a mai fost posibilă închiderea admisiei.

Exemplul 5.20. În anul 1970, în America de Nord, apariția unor defecțiuni în circuitele de protecție și automatizare la un cazan, au produs declanșarea unui grup generator de 300 MW și deconectarea pentru 3 min a unei linii de transport. Dispecerul, avizat de această situație, a dispus punerea în funcție a mai multor turbine cu gaze, aflate în rezervă rece și totodată încărcarea la nominal a celorlalte grupuri generatoare. Aceste măsuri au fost insuficient de rapid luate și supraîncărcarea principalei linii de transport a condus la declanșarea acesteia.

După 30 s o a doua unitate producătoare de energie electrică a manifestat aceleași fenomene, și a fost descărcată rapid în 3 min. Frecvența a început să scadă și ea rapid cu o viteză de 2 Hz pe minut. Să-a trecut la efectuarea unor sacrificii automate și manuale și frecvența a revenit la normal. Astfel s-a efectuat repunerea în paralel a sistemului izolat cu restul sistemului, ca urmare a încărcării la nominal a turbinelor cu gaze și a celorlalte grupuri generatoare, iar consumatorii s-au realimentat după cca o oră de la întrerupere.

Exemplul 5.21. În anul 1970, în unul din sistemele europene, a avut loc o avarie de sistem, în condiții de ceață intensă și poluare industrială. Ea a fost provocată de două defecte distincte petrecute la un interval de cîteva minute unul de altul. Schema este indicată în fig. 5.47. În primul moment, în stația de transformare ST_1, unde se funcționa cu cupla longitudinală deconectată, (separatoarele fiind închise), a conturnat izolația întreruptorului cuplei, înspre sistemul *II* de bare.

Acest defect a produs declanșarea tuturor liniilor care alimentau sistemul *II* de bare, mai puțin întreruptorul circuitului 4 din ST_2 spre ST_1, a cărui protecție de distanță a lucrat, dar întreruptorul a refuzat comanda. În aceste condiții prin dispozitivul de rezervare la refuzul de declanșare a întreruptoarelor, au declanșat toate întreruptoarele de pe bara *B* a stației ST_2. În timpul comutațiilor, ca urmare a supratensiunilor apărute din cauza declanșării nesimultane a unui întreruptor, au străpuns două descărcătoare cu suflaj magnetic de la turbogeneratorul G_1, care funcționa în ST_1 cu întreruptoarele conectate pe cele două sisteme de bare *A* și *B*, ceea ce a determinat declanșarea acestui grup, prin protecție diferențială.

În timp ce personalul de tură stabilea natura primului incident și situația declanșărilor, s-a produs un al doilea scurtcircuit pe sistemul de bare *I* din ST_1, ca urmare a conturnării separatorului cuplei transversale și a conturnării întreruptorului transformatorului TI_1. Defectele apărute au condus la declanșarea liniilor de alimentare a barei *I* din ST_1 (în ST_5 spre ST_1, în ST_2 circuitele *1* și *2* spre ST_1 și autotransformatorul AT_1

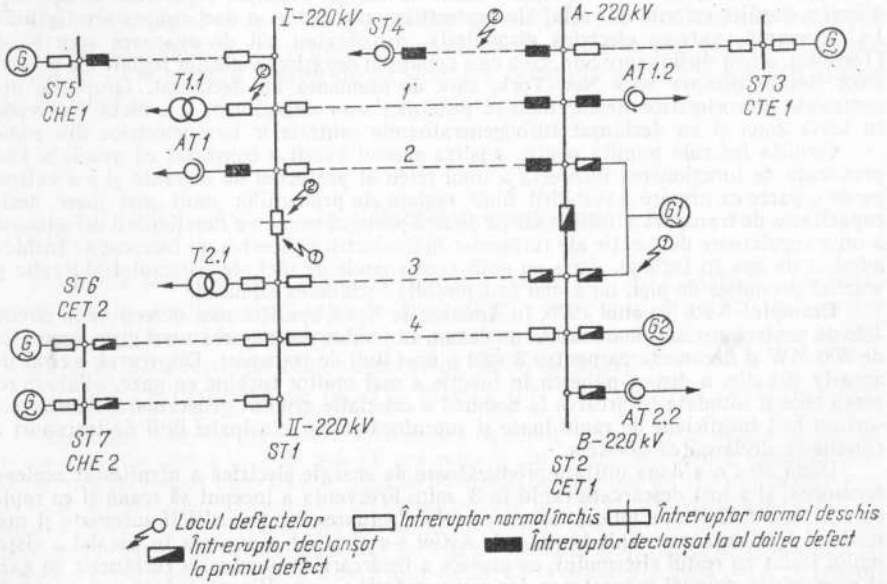


Fig. 5.47. Avarie într-un sistem de 220 kV.

Defectele s-au manifestat printr-un arc electric intermitent care a provocat variații ale tensiunii în limite foarte largi, concomitent producîndu-se și o continuare a izolației pe linia $ST_4 - ST_2$, care a declanșat la cele două capete. Restabilirea situației s-a putut face după separarea elementelor defecte.

Cauza principală a acestor avarii o reprezintă necorelarea izolației stației ST_1 cu poluare industrială compusă din pulbere de alumină și fluor, accentuată de ceața intensă existentă în zonă. Peste acestea s-au suprapus funcționări incorecte ale circuitelor de protecție (la care s-au constatat contacte imperfecte prin oxidare), precum și amorsarea descărcătoarelor de la G_1 cauzată de acțiunea combinată a supratensiunilor prelungite (de ordinul a 3,5 *Un*), cu creșterea tensiunii la bornele generatorului, ca urmare a variației bruște de sarcină.

Exemplul 5.22. În anul 1971, în Marea Britanie, consumul electric era foarte ridicat din cauza unor temperaturi anormal de scăzute. Din cauza deficitului de putere, s-a dispus reducerea cu două trepte a tensiunii, în condițiile în care capacitatea de transport din Nord spre Sud era depășită (1 880 MW față de limita normală de lucru de 1 200 MW), iar sistemul funcționa la o frecvență scăzută cu 1,14%. În acest moment a apărut un scurtcircuit pe o linie de transport de 275 kV dinspre Nord spre Sud, eliminat de protecție în 0,24 s. La încercarea de repunere a liniei sub tensiune, aceasta a declanșat din nou. Grupurile din centrale s-au supraîncărcat.

După 7 min de la producerea primului incident, s-a produs un al doilea scurtcircuit, pe o altă linie de 275 kV, eliminat prin protecție în 0,32 s. Liniile rămase în funcțiune au declanșat prin protecțiile de distanță și astfel sistemul s-a rupt în două.

În zona de sud, deficitară, frecvența a scăzut și mai mult și au intrat în funcțiune dispozitivele de descărcare automată a sarcinii.

Exemplul 5.23. Tot în anul 1971, în America de Nord, un avion a intrat în conductoarele unei linii, provocînd declanșarea a 5 linii de 138 kV, a 2 linii de 69 kV și a unui transformator de 345/138 kV. Avaria s-a produs în condițiile în care sistemul avea o rezervă turnantă foarte mică, iar prin pierderea transformatorului, s-a rupt legătura cu o centrală care producea 1 778 MW. În prima fază frecvența a scăzut cu 1% apoi a revenit aproape de nominal, iar în faza imediat următoare a scăzut din nou. Situația s-a restabilit după 13 min de la evenimentul inițial.

Exemplul 5.24. În anul 1973, în unul din statele europene, a avut loc o avarie de sistem local. Schema de funcționare este arătată în (fig. 5.48).

În stația de transformare ST_2 s-a avariat un transformator de curent din celula liniei spre ST_3. În aceste condiții au declanșat prin protecție întreruptoarele spre ST_2 din ST_1, ST_3 și ST_6. În *CHE 1* și *CHE 2*, existînd o putere electrică disponibilă mare și linii slabe de evacuare, cît și ca urmare a regimului dinamic instabil al grupurilor, după cca. 1 s de la producerea primului eveniment, ca urmare a pendulațiilor apărute, au declanșat grupurile din *CHE 1* și *CHE 2* și totodată și întreruptoarele din ST_1 spre ST_4.

Analiza avariei a scos în evidență, în afara calității necorespunzătoare a transformatorului de curent avariat și faptul că elementele direcționale ale protecțiilor din ST_2 s-au orientat greșit, scurtcircuitul fiind chiar în stația ST_2. Curentul de defect, care a parcurs centura de punere la pămînt a stației, a determinat o astfel de modificare a tensiunilor secundare, încît a fost posibilă orientarea eronată a elementelor direcționale.

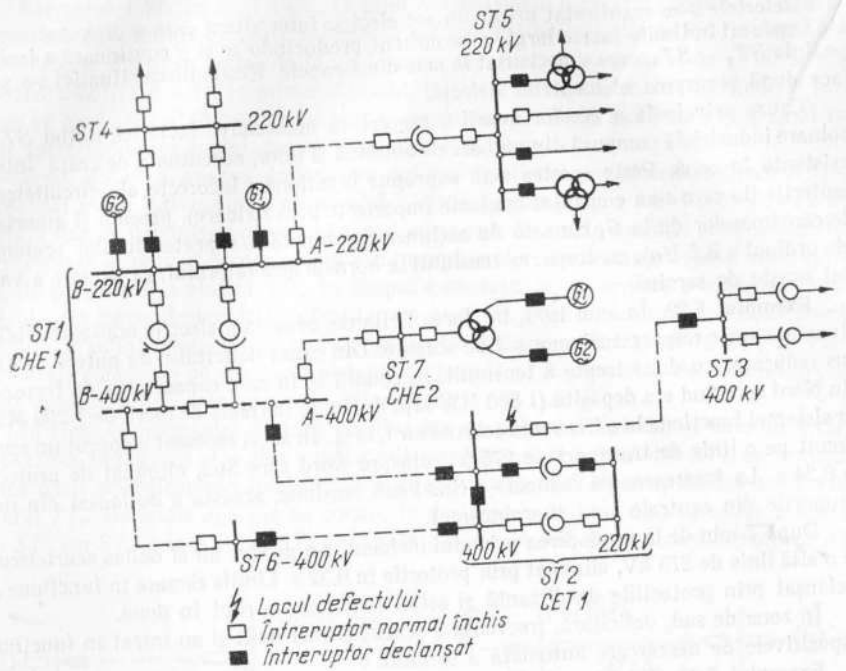


Fig. 5.48. Avarie într-un sistem de 400 și 220 kV.

5.6.5. Măsuri pentru prevenirea și limitarea efectelor avariilor de sistem

Consecințele deosebite pe care le poate avea o avarie de sistem, au condus practic în toate țările, la luarea unor măsuri speciale, independent de cele de ridicare a calității echipamentelor și materialelor. Ele se situează în toate domeniile, începînd de la cercetare și pînă la instruirea personalului, cuprinzînd în sfera lor și aspecte tehnice și aspecte de legislație.

Analizele individuale și cea globală a avariilor de sistem, dintre care unele mai semnificative au fost redate mai sus au scos în evidență cîteva concluzii importante și anume:

— incidentele primare majore apar în rețelele aeriene de înaltă și foarte înaltă tensiune, care sînt de altfel cele mai expuse condițiilor de mediu ambiant;

— în majoritatea cazurilor incidentul primar este urmat de alte incidente în cascadă, supratensiunile sau suprasarcinile apărute, găsind alte puncte slabe de avariere a instalațiilor;

— defectul primar cel mai grav este cel trifazat, care poate fi provocat fie de condiții excepționale meteorologice, fie de către personalul de exploatare (deschidere eronată sub sarcină a separatoarelor sau darea tensiunii pe instalații scurtcircuitate și legate sau nelegate la pămînt);

— majoritatea cazurilor de avarii ale sistemelor energetice au avut loc în zile de lucru, atunci cînd încărcarea sistemului este relativ mai mare și cînd se execută un volum mai mare de lucrări de întreținere sau de racordare a lucrărilor noi;

— regulatoarele automate de tensiune, dependente de sarcină, în multe cazuri, s-au dovedit a fi elemente dezavantajoase menținerii stabilității sistemelor energetice;

— interconexiunea cît mai puternică a sistemelor energetice, reprezintă categoric un avantaj de necontestat.

Principalele măsuri care se iau pentru prevenirea și limitarea efectelor avariilor de sistem sînt următoarele:

— în domeniul protecției prin relee, o mare eficacitate o au acționările rapide, de ordinul a 20—40 ms. și chiar mai puțin, care separă foarte rapid elementul defect;

— foarte eficiente s-au demonstrat a fi dispozitivele de descărcare automată a sarcinii (DAS), descărcarea automată la nivel scăzut de tensiune (DAT) și descărcarea automată la frecvențe minime, în tranșe (DAF), care chiar dacă efectuează sacrificii de valori mai mari decît cele necesare pentru moment, asigură în schimb o stabilitate mărită a sistemului și implicit o restabilire mult mai rapidă;

— tot pe linia automatizării funcționării sistemului, prezintă importanță utilizarea, în special pentru liniile electrice aeriene, a reanclanșărilor automate rapide mono sau trifazate (RARM și RART) a căror introducere a avut la bază concluzia că, din totalul scurtcircuitelor care apar pe o linie aeriană, cca. 75—90% sînt monofazice, iar din acestea, peste 80% se datorează unor defecte trecătoare;

— la mașinile sincrone, foarte eficiente sînt regulatoarele automate de tensiune (RAT). În schimb este mai puțin recomandabil ca asemenea automatizări, mai ales dependente de sarcină, să fie utilizate la transformatoarele de putere;

— modificarea din construcție, proiectare sau în exploatare a parametrilor sistemului și în primul rînd micșorarea reactanței elementelor componente prin: micșorarea prin construcție a reactanței tranzitorii a generatoarelor sau reactanțelor liniilor electrice aeriene (conductoare jumelate, compensări longitudinale, ș.a) precum și introducerea unor stații de conexiune intermediare;

— legarea la pămînt a neutrului transformatoarelor prin rezistenţe sau reactanţe, micşorează valoarea curentului de secvenţă homopolară, uşurînd condiţiile avariei ;

— limitarea sarcinii active şi creşterea încărcării reactive la generatoarele din centralele îndepărtate, asigură funcţionarea acestora cu un unghi mic de decalaj faţă de restul sistemului şi deci cu o rezervă mărită de stabilitate ;

— menţinerea unui nivel cît mai ridicat a tensiunii în sistem ;

— producerea energiei reactive cît mai aproape de locul de consum, mai ales prin compensatoare sincrone ;

— îmbunătăţirea conducerii operative prin dispecer şi în mod cu totul special, introducerea unor modele matematice, care prin prelucrarea automată a datelor să poată stabili, pentru variantele prioritare de funcţionare posibile, schemele şi regimurile cele mai avantajoase din punct de vedere economic şi sub aspectul rezervei de stabilitate ;

— perfecţionarea personalului de exploatare, selectarea şi testarea psiho-profesională a acestuia ;

— asigurarea unor surse locale de intervenţii pentru consumatorii vitali, metrouri, iluminatul tunelelor, ascensoare în blocuri foarte înalte, spitale, ş.a. precum şi asigurarea unui iluminat local de siguranţă ;

— modificarea concepţiei de proiectare şi exploatare a sistemelor energetice, în sensul de a se acorda prioritate gradului de siguranţă în funcţionarea sistemului energetic, faţă de alte criterii posibile.

Măsurile enunţate mai sus nu sînt nici limitative şi nici imuabile. Ele se vor modifica pe măsura dezvoltării cercetării ştiinţifice, a introducerii progresului tehnic.

BIBLIOGRAFIE

5.1. Bercovici, M. şi Arie, A. *Reţele electrice. Calculul mecanic.* Editura tehnică, Bucureşti, 1963.

5.2. Verebely, L. *Villamos Eröátvitel*, (vol. 3.) Müszabi Kiadó, Budapesta, 1958.

5.3. Baciu, A. şi Laszlo, T. *Exploatarea şi repararea reţelelor electrice.* Editura tehnică, Bucureşti, 1969.

5.4. *Comportarea în exploatare a echipamentelor.* Referate anuale ICEMENERG 1960—1975.

5.5. Winants ş.a. *Le galop des conducteurs des lignes ectriques.* CIGRÉ Rap. 22-06, 1970.

5.6. Liberman, A. I. *Les oscillations en porteés partielles et le galop des conducteurs sur les lignes à haute tension.* Rap. 22—09 CIGRÉ, 1974.

6. CONDIȚII DE PRODUCERE ȘI TEHNICA PREVENIRII AVARIILOR DIN INSTALAȚIILE ELECTRICE

6.1. REGIMURI NORMALE DE FUNCȚIONARE

Prin regimuri normale de funcționare se înțeleg condițiile care au ost luate în considerare la proiectarea unei instalații și anume: condi-iile de mediu și eforturile datorite mediului exterior (temperatură, umi-litate, vînt, depuneri de ghiață etc.), sarcinile electrice (curent, putere activă și reactivă care circulă prin elementele instalației, tensiuni de regim permanent sau tranzitoriu) și sarcinile mecanice și termice rezul-tate din principiul constructiv-funcțional al instalației.

Astfel, de exemplu, pentru o linie electrică, prin regimuri normale de funcționare se înțeleg:

— Temperatura mediului ambiant între —30 și +40°C viteza vîn-tului maximă de 30—35 m/s (după zonă), depuneri de ghiață de pînă a 23 mm grosime radială.

— Funcționare la tensiune nominală cu creștere de max. 10% în regim permanent și supratensiuni în limitele standardului de coordonare a izolației.

— Funcționare la un curent de sarcină ce nu depășește limita ter-nică corespunzătoare secțiunii conductorului.

Apariția unor avarii în aceste condiții semnalează existența unor deficiențe de concepție, de execuție sau de întreținere.

Exemple de avarii tipice, în regim normal de funcționare:

— *Rupere de stîlp*, fără depășirea efortului de calcul. Cauze posibile: subdimen-ionare la proiectare, nerespectarea dimensiunilor sau materialelor folosite la execuție, degradarea materialului prin neîntreținere.

— *Conturnare de izolație*, în regim normal de tensiune. Cauze posibile: depuneri de substanțe poluante, elemente de lanț izolant deteriorate și neînlocuite la timp.

— *Deteriorarea armăturilor de protecție după cîteva conturnări.* Cauze posibile: ne-concordanță între capacitatea de stingere a armăturilor de protecție și curenții de arc electric.

— *Încălzirea pieselor de contact electric.* Cauze posibile: subdimensionarea contac-tului, execuția neîngrijită a îmbinărilor.

Apariția unor avarii în regimuri normale de funcționare atrage aten-ția celor ce analizează avaria asupra unor greșeli de proiectare, montaj sau întreținere. Pentru selectarea și evidențierea acestora este necesară reconstituirea cît mai exactă a evenimentului și verificarea prin calcule sau măsurători a eforturilor ce puteau să apară în elementele deteriorate.

Uneori avariile în regimuri normale scot în evidență solicitări insu-ficient cunoscute la data proiectării, sau defecțiuni ascunse ale procesului de fabricație sau de montaj. Sînt multe cazuri în care astfel de avarii atrag atenția asupra unei stări de degradare a instalației (de exemplu izolație umedă sau îmbătrînită), care i-a redus rezistența față de solici-tările normale.

6.2. CONDIȚII DE SUPRASOLICITĂRI ELECTRICE

Suprasolicitarea electrică ale ementelor rețelei poate fi de mai multe feluri, în funcție de natura elementului respectiv. La elementele con-ducătoare de curent, suprasolicitările apar ca urmare a depășirii curen-tului nominal. La elementele izolante, suprasolicitările apar ca urmare a depășirii tensiunii nominale.

Prin curent nominal se înțelege acea valoare a curentului pentru care a fost dimensionată instalația respectivă.

Funcționînd la curentul nominal, elementele rețelei se mențin în li-mitele de temperatură maxim admise la regim de durată. Forțele electro-dinamice sînt de obicei neglijabile în acest regim.

Depășirea curentului nominal conduce la creșterea treptată a tempera-turii elementelor circuitului respectiv iar forțele electrodinamice cresc instantaneu. Deoarece creșterea temperaturii are loc cu întîrziere iar majoritatea elementelor rețelei suportă pe timp limitat o anumită creș-tere a temperaturii peste cea normală, suprasolicitarea electrică este acceptabilă în anumite limite, care pot fi determinate pentru fiecare ele-ment conducător de curent.

Astfel, pentru un element conducător de curent, (de exemplu un con-ductor neizolat, aflat în aer), temperatura de funcționare în regim per-manent, rezultă dintr-o relație de forma:

$$\rho \frac{I^2}{\pi \frac{d^2}{4}} = k_c \pi d(T_1 - T_2) + k_r \pi d(T_1^4 - T_2^4), \qquad (6.1)$$

ea ce reprezintă egalitatea dintre căldura degajată pe unitatea de ngime a unui conductor, de rezistivitate ρ, diametru d și parcurs de urentul I — și căldura evacuată pe aceeași unitate de lungime de conuctor, avînd diametrul d și temperatura T_1, atunci cînd temperatura ediului este T_2; k_c este coeficientul de transmitere a căldurii prin conecție W/m²·°C; k_r — coeficientul de transmitere a căldurii prin radiae W/m²·°C.

Din relația (6.1) rezultă dependențe de următoarea formă:

$$I = k_1 d^{3/2} \quad \text{(la } T_1 \text{ și } T_2 \text{ constante)}; \tag{6.2}$$

$$I \approx k_2 \Delta T^{1/2} \quad \text{(la } d = \text{constant)} \tag{6.3}$$

unde $\Delta T = T_1 - T_2$.

Neglijînd componenta de radiație, avem

$$\Delta T = \frac{4\rho}{\pi^2 k} \cdot \frac{I^2}{d^3}. \tag{6.4}$$

Din relațiile de mai sus se poate observa că curentul admisibil de urată este de fapt dependent de condițiile de mediu și că valoarea acesuia se reduce considerabil în cazul creșterii temperaturii mediului exteior, sau poate să crească considerabil în cazul ameliorării condițiilor le schimb de căldură (mărirea coeficientului k_c prin convecție forțată). Cu alte cuvinte, suprasolicitarea poate să apară fără creșterea curentului, i din cauza schimbării condițiilor de mediu față de cele inițial considerate. Din aceleași motive, o suprasolicitare față de condițiile inițiale poate i suportată fără pericol, dacă se realizează condiții de schimb de căldură mai favorabile decît cele inițial considerate.

Principiile expuse mai sus prezintă valabilitate generală și au o importanță deosebită în aprecierea condițiilor de solicitare a elementelor conlucătoare de curent în regim permanent. Referitor la suprasolicitările

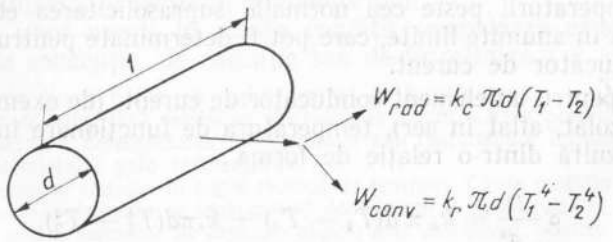


Fig. 6.1. Degajarea căldurii într-un conductor cilindric.

de scurtă durată, prezintă un interes deosebit analiza fenomenului tranzitoriu și anume, în special în perioada de creștere a temperaturii.

În această situație, cantitatea de căldură degajată în conductor este mai mare decît cea care se cedează mediului, diferența fiind înmagazinată în conductor, care în consecință își mărește temperatura.

Ecuația schimbului de căldură, în acest caz este:

$$W dt = cm d\Delta T + kF\Delta T dt \tag{6.5}$$

unde: $W dt$ este energia degajată în unitatea de timp dt ($W = rI^2$, r — rezistența, I — curentul);

$cm\Delta T$ — energia înmagazinată în masa conductorului m [kg] de căldură specifică c [J/kg·°C] la creșterea diferenței de temperatură $d\Delta T$ [°C];

$kF\Delta T$ — căldura evacuată în unitatea de timp dt, prin suprafața de schimb de căldură F, la diferența de temperatură ΔT [°C] (s-a considerat numai convecția, radiația fiind mică la temperaturile obișnuite).

Soluția ecuației diferențiale (6.5) este:

$$\Delta T = \Delta T_{stab}\left(1 - e^{\frac{kF}{cm} t}\right) \tag{6.6}$$

unde $\Delta T_{stab} = \frac{4\rho}{\pi^2 k} \frac{I^2}{d^3}$, în cazul conductorului neizolat (6.4).

Variația în timp a diferenței de temperatură ΔT este arătată în fig. 6.2. Se remarcă două zone caracteristice: prima zonă, în apropiere de $t = 0$, în care variația este aproape liniară, fiind predominantă acumularea de căldură, și a doua zonă, pentru valori mari ale temperaturii în care variația tinde către zero, temperatura apropiindu-se de regimul stabilizat. În a doua zonă predomină schimbul de căldură.

Pentru variația temperaturii în zona apropiată de $t = 0$ se consideră, cu bună aproximație, relația:

$$Wt = cm\Delta T, \tag{6.7}$$

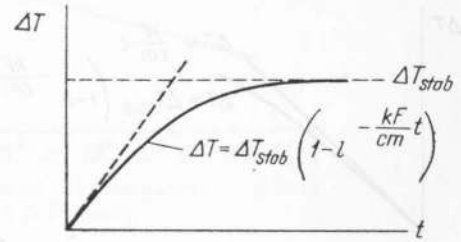


Fig. 6.2. Variația creșterii de temperatură a unui conductor în funcție de timp.

de unde $\Delta T = \frac{W}{c \cdot m} t$.

Pentru un conductor de lungime unitară

$$W = \frac{\rho}{\frac{\pi d^2}{4}} I^2 \text{ și } m = \gamma \frac{\pi d^2}{4},$$

le unde :

$$\Delta T = \frac{16}{\pi^2} \cdot \frac{\rho}{d^4} I^2 t. \qquad (6.8)$$

Această relație se folosește deobicei pentru determinarea variației emperaturii elementelor conducătoare de curent în caz de scurtcircuit, adică pe intervale de timp de ordinul 1 pînă la 5 s. Eroarea care se comite prin neglijarea căldurii pierdute în acest timp este în sensul supraestimării temperaturii, deci creează un coeficient de siguranță (fig. 6.3).

Avînd în vedere efectele termice și dinamice posibile, în cele ce urmează se vor considera următoarele cazuri tipice de depășire a curentului nominal :

— depășiri de scurtă durată (0 pînă la 5 s) ;
— depășiri de durată medie (30 s pînă la 1—2 h) ;
— depășiri de lungă durată (de peste 1—2 h).

Depășirile de scurtă durată prezintă importanță numai atunci cînd ating valori foarte mari, deoarece în acest caz forțele electrodinamice pot deveni periculoase iar temperaturile pot atinge valori mari chiar și în timp scurt. Acesta este cazul curenților de scurtcircuit.

Se menționează că creșterea de temperatură de scurtă durată este considerabil mai mare decît cea de lungă durată. Astfel în cazul materialelor electroizolante utilizate la cablurile electrice, temperaturile de funcționare admisibile se clasifică în funcție de durată (v. tabelul 6.1.).

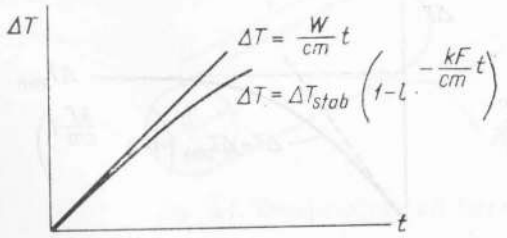


Fig. 6.3. Creșterea de temperatură în perioada inițială.

Tabelul 6.1

Felul izolației	Temperatura admisibilă, °C		
	în regim de durată	în regim de suprasarcină	în regim de scurtcircuit
Hîrtie	60—70	70— 80	140—160
PVC	60—70	70— 80	150—160
Polietilenă	60—70	70— 80	140—150
Polietilenă reticulată	90	90—100	250
Cauciuc etilen-propilen	90	90—100	250

Creșterile de temperatură admise de scurtă durată sînt în general determinate de pericolul scăderii rezistenței mecanice, concomitent cu apariția unor eforturi electrodinamice.

Acest pericol există și la conductoare, în special la cele de aluminiu, a căror rezistență mecanică scade considerabil la creșterea temperaturii peste 200°C (tabelul 6.2).

Tabelul 6.2

Variația rezistenței mecanice a sîrmei de aluminiu în funcție de temperatură

t(°C)	20	100	200	300	400
σ, daN/mm²	14,5	14	13	10,5	8,4

Creșterile de sarcină de durată medie sînt periculoase chiar și la valori relativ modeste (de ordinul 1,5—2 ori curentul nominal). În aceste cazuri, forțele electrodinamice sînt neglijabile, însă creșterile de temperatură pot pune în pericol contactele electrice sau izolația.

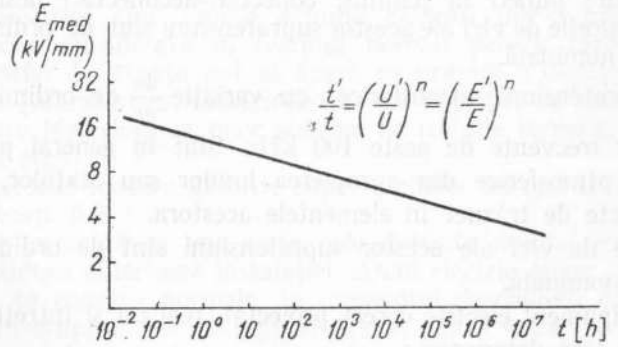


Fig. 6.4. Caracteristica tensiunii de funcționare — durata de viață a polietilenei.

Prin *tensiune maximă* se înțelege valoarea maximă a tensiunii la care instalația trebuie să funcționeze sigur, în regim permanent (CEI 71—1.). Depășirea tensiunii în regim permanent conduce, în cazul materialelor electroizolante solide, la îmbătrînirea izolației, durata de viață reducîndu-se în conformitate cu o relație de tipul: (fig. 6.4),

$$\frac{t'}{t} = \left(\frac{U'}{U}\right)^n. \qquad (6.9)$$

La izolațiile gazoase, depășirea tensiunii în regim permanent conduce la apariția efectului Corona, cu toate consecințele sale nefavorabile.

Creșterile de tensiune care apar în mod permanent în exploatare în funcție de tensiunea nominală sînt de următoarele tipuri:

— Creșteri de tensiune, de frecvență normală, de ordinul 10—20% peste cea de regim normal, determinate de dificultăți ale reglajului tensiunii. Durata acestora poate fi de ordinul minutelor sau orelor. Se menționează că tensiunile maxime (conf. CEI 71-1) au fost astfel alese în mod obișnuit să nu fie depășite aceste creșteri.

— Creșteri de tensiune, de frecvență normală, de pînă la $\sqrt{3}U_m$ determinate de apariția unei puneri la pămînt accidentale pe o fază. Durata acestora este cel mult de ordinul secundelor în rețelele cu neutrul legat la pămînt (deoarece la acestea o punere la pămînt este echivalentă cu scurtcircuitul monofazat și este deconectată automat prin protecție); în schimb la rețelele cu neutru izolat sau tratat prin bobină de stingere, durata de funcționare cu tensiune mărită poate fi de ordinul orelor.

— Supratensiuni de comutație, cu variație $\frac{du}{dt}$ corespunzător unor frecvențe de 10 kHz — 100 kHz, provocate de procese tranzitorii ca de exemplu: puneri la pămînt, conectări-deconectări nesimultane pe faze etc. Valorile de vîrf ale acestor supratensiuni sînt de ordinul 3—5 ori tensiunea nominală.

— Supratensiuni atmosferice, cu variație $\frac{du}{dt}$ de ordinul corespunzător unor frecvențe de peste 100 kHz. Sînt în general provocate de descărcări atmosferice din apropierea liniilor sau stațiilor, sau de lovituri directe de trăznet în elementele acestora.

Valorile de vîrf ale acestor supratensiuni sînt de ordinul 4—6 ori tensiunea nominală.

Un echipament electric corect proiectat, realizat și întreținut, trebuie să suporte fără deteriorări:

— tensiunea maximă (U_m) în regim permanent;

— creșteri de tensiune de pînă la $\sqrt{3}U_m$;
— supratensiuni de comutație (conform tab. 6.3);
— supratensiuni atmosferice (conf. tab. 6.3).

Tabelul 6.3

Nivele de izolație, conform CEI 71-1

Tensiune nominală kV	Tensiune maximă kV	Supratensiune atmosferică kV_{max}	Supratensiune de comutație kV_{max}
6	7,2	60	(20)
10	12	75	(28)
20	24	125	(50)
110	123	450/550	(185/220)
220	245	950/1 050	(395/460)
400	420	1 175/1 300	950/1 050

Obs.: Valorile din paranteză reprezintă tensiunea de încercare la frecvență industrială (kVef).

Suprasolicitări față de regimurile de tensiune arătate mai sus conduc la deteriorări ale izolației, explicabile prin depășirea condițiilor de proiectare. Deteriorări ale izolației constatate într-un regim de tensiune care se încadrează în condițiile arătate mai sus, relevă existența unor puncte slabe, anormale.

6.3. CONDIȚII DE SUPRASOLICITĂRI TERMICE

Prin suprasolicitare termică se înțeleg situațiile în care elemente ale instalațiilor electrice sînt supuse acțiunii căldurii într-o măsură mai mare decît cea considerată în regimul normal pentru care au fost construite. Astfel de situații pot să apară ca urmare a depășirii curentului nominal (suprasarcini, scurtcircuite), sau apariției de surse de căldură exterioare (deteriorarea unor sisteme de izolație termică, arc electric, incendiu etc.).

Suprasolicitările termice datorite suprasarcinilor au fost tratate amănunțit la subcap. 6.2.

În cele ce urmează se vor trata cele datorite arcului electric sau surselor de căldură exterioare instalației. Arcul electric apare în instalațiile electrice în condiții normale, în momentul deschiderii contactelor mobile ale întreruptoarelor și separatoarelor. Dacă parametrii acestui arc se încadrează în limitele capacității de rupere a întreruptorului sau separatorului, el se stinge fără consecințe.

Dacă însă arcul electric apare în alte puncte, sau dacă arcul apărut între contactele mobile ale întreruptorului sau separatorului depăşeşte capacitatea de rupere a acestora, apar efectele sale devastatoare. Arcul electric se formează în condiţiile trecerii unui curent mai mare (peste 20—30 A), avînd la dispoziţie şi o sursă de tensiune corespunzătoare (de peste 80—100 V).

Suprasolicitările periculoase datorate arcului electric apar în următoarele cazuri :

— *Arc electric de sudură ;* curenţi de 100—1 000 A, tensiuni de pînă la 200 V. Puteri aparente între 20 şi 50 kVA. Durata de acţionare de ordinul minutelor.

— *Arc electric de scurtcircuit, în reţele de joasă tensiune :* curenţi de 5—20 kA, tensiuni între 10 şi 20 V. Puteri aparente de ordinul 1—2 MVA Durata de acţionare de ordinul 1 ms—1 s.

— *Arc electric de punere la pămînt* (conturnări) *în reţele de medie tensiune cu neutrul izolat :* curenţi de ordinul 10—50 A, tensiuni de ordinul 100—1 000 V, puteri aparente de ordinul 1—50 kVA. Durata de acţionare de ordinul secundelor sau minutelor.

— *Arc electric de scurtcircuit în reţelele de medie şi înaltă tensiune :* curenţi de ordinul 10—30 kA, tensiuni de ordinul 1—20 kV. Puteri aparente de ordinul 100—600 MVA. Durata de acţionare de ordinul 1 ms—1 s.

Efectele periculoase ale arcului electric rezultă din temperatura mare de funcţionare (3 000—4 000°C) şi cantităţile relativ mari de energie disipată în timp foarte scurt. Datorită temperaturilor mari, arcul electric poate provoca topirea elementelor metalice ale instalaţiei electrice şi aprinderea materialelor izolante combustibile (uleiuri izolante, hîrtie, cauciuc, PVC, mase bituminoase ş.a.), dar chiar şi a unor elemente metalice (bare de aluminiu : temperatura de topire 658 grd, temperatura de vaporizare 2 270 grd, căldură de topire 355 kJ/kg, căldură de vaporizare 11 400 kJ/kg).

Temperatura mare a arcului electric şi energia mare radiată pot provoca şi deteriorări prin dilatarea bruscă a materialelor, vaporizarea unor lichide şi expansiunea gazelor.

Efectele arcului electric depind în principal de puterea activă disipată şi de durata de acţionare.

În acest sens se vor considera cîteva exemple.

Exemplul 6.1. Topirea unor bare colectoare din aluminiu, sub acţiunea arcului electric de scurtcircuit (fig. 6.5).

Masa de conductor : 2,7 kg/dm³ × 0,1 dm² = 0,27 kg/dm = 2,7 kg/m.

Căldura de topire : 355 kJ/kg × 2,7 kg/m = 950 kJ/m.

Un arc electric scurtcircuit de $I = 10$ kA, cu $U = 1$ kV (distanţa între bare cca 25 cm), deci $P = 10\,000$ kW poate topi, cu randament de 0,5 (pierderi prin radiaţie), cca. 5 m bară/s, respectiv cu o viteză de avans de 2,5 m/s (fig. 6.6).

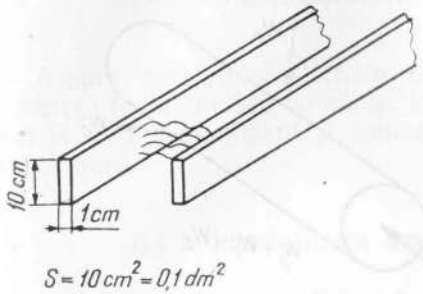


Fig. 6.5. Arc electric între bare colectoare din aluminiu.

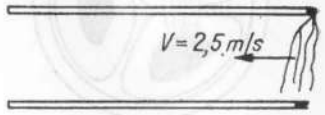


Fig. 6.6. Propagarea incendiului produs de arc în lungul barei colectoare.

Exemplul 6.2. Efectul de aprindere : pentru a declanşa un incendiu de cablu este necesară degajarea a cca. 2—3 kWh (7 000—10 000 kJ).

Considerînd un arc electric de $I = 10$ kA şi $U = 0{,}1$ kV (distanţa între conductoare, cca. 1—2 cm), puterea degajată este de cca. 1 000 kW. Randamentul de transmiterea căldurii fiind aproape de 1 (arcul este în interiorul cablului), durata necesară aprinderii cablului este de cca. 10 s (fig. 6.7).

Un caz particular de suprasolicitare datorat arcului electric apare atunci cînd acesta are loc între contactele unui separator sau întreruptor în condiţiile depăşirii capacităţii de rupere ale acestora. Astfel de exemplu dacă un separator se deschide sub sarcină, arcul electric nu poate fi stins ci se întinde, iniţial între contactele ce se deschid, apoi se extinde spre barele învecinate. În perioada iniţială acest arc are ca efect topirea contactelor şi a pieselor metalice de legătură. În perioada următoare, arcul dintre contacte se extinde spre fazele învecinate sau spre elementele legate la pămînt, transformîndu-se în arc electric de scurtcircuit. Dacă arcul apare între contactele unui întreruptor, în condiţiile depăşirii capacităţii de rupere ale acestuia, arcul se reaprinde după fiecare trecere prin zero a curentului alternativ, topeşte piesele de contact, descompune elementele camerei de stingere şi se extinde în exteriorul acesteia, încheindu-se printr-un scurt-circuit între faza sau faţă de pămînt. Dacă în camera de stingere se află ulei, acţiunea îndelungată a arcului conduce la vaporizarea şi incendierea sau explozia acestuia.

Sursele de căldură exterioare pot crea suprasolicitări cu urmări grave.

Se menţionează în acest sens următoarele cazuri semnificative :

— supraîncălzirea unor conductoare neizolate sub acţiunea radiaţiei solare (fig. 6.8) ;

— supraîncălzirea unor cabluri sub acţiunea căldurii cedate de o conductă termică (fig. 6.9) ;

— incendierea unui transformator sub acţiunea uleiului de turbină aprins ce se scurge dinspre turbină prin canalele de cabluri (fig. 6.10).

Fig. 6.7. Arc electric în interiorul unui cablu.

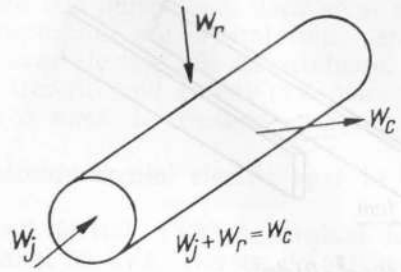


Fig. 6.8. Încălzirea unui conductor sub acțiunea radiației solare.

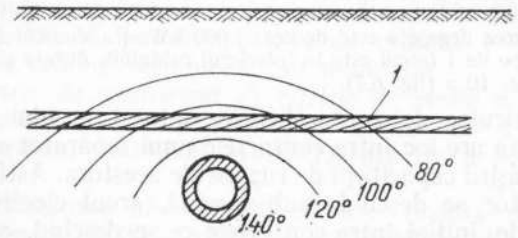


Fig. 6.9. Încălzirea unui cablu sub influența unei conducte termice.

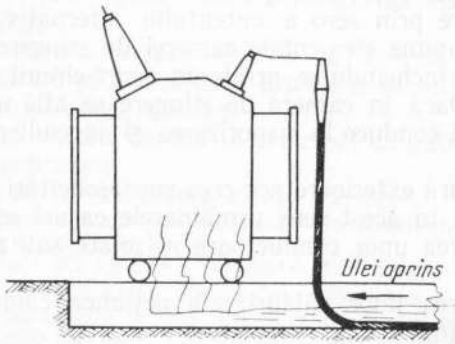


Fig. 6.10. Incendierea unui transformator, prin uleiul aprins, scurs din sala turbinelor.

6.4. SUPRASOLICITĂRI MECANICE

Asupra instalațiilor electrice, din punct de vedere mecanic, pot influența : instabilitatea terenului, loviturile mecanice, precum și alți factori ai mediului ambiant și anume : temperatura, vîntul și depunerile de chiciură.

6.4.1. Instabilitatea terenului

La proiectarea instalațiilor electrice se ține seama și de fenomenele posibile de instabilitate ale terenului, datorate alunecării sau cutremurelor.

Traseul liniilor electrice, ca și amplasamentul construcțiilor instalațiilor electrice, se verifică la proiectarea lor și din punct de vedere geologic. Funcție de structura terenului se stabilesc traseele, respectiv amplasamentele și în baza acelorași date se dimensionează fundațiile.

Clădirile instalațiilor electrice se dimensionează și în funcție de gradul de seismicitate cunoscut al zonei respective.

Cu toate aceste măsuri au apărut cazuri de suprasolicitări mecanice ale instalațiilor electrice, ca urmare a instabilității terenului. Cele mai dese cazuri s-au datorat alunecărilor de teren pe care au fost amplasate linii electrice aeriene sau tasărilor de teren, acestea mai ales în cazul cablurilor subterane și în unele cazuri la clădiri.

La cutremure, instalațiile electrice se comportă în general bine, cele mai afectate fiind, funcție de gradul de intensitate al cutremurului, stațiile și posturile de transformare. Astfel, ca urmare a cutremurului din 4 martie 1977, care s-a manifestat asupra unei părți a teritoriului R.S.R. cu o intensitate de gradul 7,2 după scara Richter, au apărut avarii caracteristice manifestate prin :

— deplasări ale autotransformatoarelor și transformatoarelor de puteri între 10 și 400 MVA, în lungul șinelor de rulare sau perpendicular pe acestea ;

— ruperi sau fisurări ale izolatoarelor de transformatoare și autotransformatoare, ale coloanelor de întreruptoare, ale izolatoarelor reductoarelor de curent sau de tensiune, precum și ale descărcătoarelor de înaltă tensiune ;

— deplasări de pe poziția stabilă sau căderi ale bateriilor de acumulatoare staționare ;

— deplasări sau prăbușiri ale transformatoarelor de medie tensiune, amplasate pe platformele posturilor de transformare aeriene, cu ruperea legăturilor electrice.

Mișcarea produsă de cutremur a fost atît de mare încît aproape toate transformatoarele și autotransformatoarele mari au declanșat prin protecția de gaze, ca urmare a circulației puternice de ulei produse în acele momente, care au deplasat flotoarele releelor Bucholz.

Liniile electrice aeriene precum și cele în cablu subteran nu au avut de suferit din cauza cutremurului, ca dealtfel nici clădirile stațiilor și posturilor de transformare.

S-au luat ca măsuri de prevenire a unor fenomene similare, printre altele: o consolidare mai fermă a transformatoarelor și autotransformatoarelor de putere la căile de rulare, încercarea la seismicitate a aparatajului electric de comutație primară, înlocuirea bateriilor de acumulatoare clasice cu baterii semiuscate staționare, precum și renunțarea la posturile de transformare aeriene cu balustradă și trecerea la sistemul de agățare a transformatoarelor aeriene.

6.4.2. Lovituri mecanice

La proiectarea instalațiilor electrice, în general, nu se iau în considerare suprasolicitările provenite din lovituri mecanice.

Asemenea situații au apărut totuși în exploatarea instalațiilor electrice. Cele mai frecvente cazuri sînt cele de loviri ai stîlpilor de către vehicole, sau de avioane pătrunse în zona conductoarelor, sau de loviri ale cablurilor subterane, la execuția unor săpături pentru fundații de clădiri noi sau la amplasarea indicatoarelor de circulație pe drumurile publice.

Astfel în anul 1977, într-unul din statele europene, un helicopter a căzut peste o linie de 110 kV cu dublu circuit și o linie de 60 kV, rupînd cinci conductoare de 110 kV și cele trei conductoare ale liniei de 60 kV. Ca urmare a scurtcircuitului produs, helicopterul a luat foc însă conductoarele au amortizat căderea, pasagerii putîndu-se salva.

Ca măsuri preventive, în apropierea aeroporturilor se balizează stîlpii și conductoarelor liniilor electrice aeriene cu balizaj de zi și de noapte.

Cablurile subterane se protejează cu elemente solide (tuburi din beton sau cărămizi) în zone de subtraversare a drumurilor publice sau se avertizează existența lor prin plăci din policlorură de vinil pozate deasupra cablului, iar la suprafață, în unele cazuri, prin indicatoare de traseu.

6.4.3. Acțiuni ale variațiilor de temperatură date de mediul ambiant

Variațiile de temperatură influențează din punct de vedere mecanic conductoarele liniilor aeriene, barele stațiilor de transformare precum și dispozitivele de acționare ale întrerupătoarelor.

La conductoarele liniilor electrice aeriene, variația temperaturii influențează asupra lungimii lor. Variind lungimea, variază eforturile și săgețile conductoarelor. De aceea la proiectarea și construcția liniilor electrice aeriene se ține seama de:

— valorile maxime ale temperaturii, la care săgeata conductoarelor este maximă (dacă temperatura depășește temperatura critică);

— valorile minime ale temperaturii, la care efortul în conductor poate deveni maxim (dacă deschiderea medie dintre stîlpi este mai mică decît deschiderea critică);

— valorile medii anuale ale temperaturii, la care se verifică efortul de durată la vibrații;

— temperatura de formare a chiciurii.

În prescripțiile existente în R.S.R. [6.8 și 6.9], valorile luate în considerare, la calculul mecanic al liniilor electrice aeriene, sînt în ordine: —30°C, +40°C, +15°C și —5°C.

Aceste temperaturi de calcul diferă de la țară la țară, funcție de experiență și de banca de date meteorologice cu caracter statistic dobîndite în timp.

La dimensionarea barelor și legăturilor din stațiile de transformare și de conexiune de tip exterior se ține seama și de variațiile de temperaturi ale mediului ambiant, fără însă ca acestea să fie determinante (au prioritate efectele eforturilor electrodinamice în condițiile de scurtcircuit).

Dispozitivele de acționare, în special cele ale întreruptoarelor, pot fi influențate în funcționarea lor de temperaturi scăzute ale mediului ambiant. De aceea, în unele cazuri se prevăd rezistențe de încălzire.

6.4.4. Acțiuni ale intensității vîntului

Viteza sporită a vîntului poate conduce la suprasolicitarea mecanică a instalațiilor electrice. Elementele cele mai solicitate sînt conductoarele liniilor electrice aeriene.

În acțiunea staționară a vîntului asupra conductoarelor, presiunea (p în N/m²), exercitată de vînt, este egală cu:

$$p = K\rho \cdot \frac{v^2}{2} = K \cdot q, \qquad (6.10)$$

nde s-a notat cu: v viteza vîntului, în m/s; ρ — densitatea aerului, 1 kg/m³; q — presiunea teoretică în N/m².

În funcție de viteza și de presiunea teoretică, vînturile se clasifică onform tabelului 6.4.

Tabelul 6.4

Clasificarea vînturilor în funcție de intensitate și de presiunea teoretică

Gradul vîntului	Denumirea vîntului	Viteza vîntului (v) m/s	Presiunea teoretică (p) N/m²
0	liniștit	0— 0,5	0
1	încet	0,6— 1,7	0,2— 1,8
2	ușor	1,8— 3,3	2,0— 6,2
3	slab	3,4— 5,2	7,2— 16,8
4	moderat	5,3— 7,4	17,0— 34,0
5	răcoros	7,5— 9,8	35,0— 60,0
6	puternic	9,9—12,4	61,1— 97,0
7	foarte puternic	12,5—15,2	98,0—142,0
8	furtună	15,3—18,2	146,0—206,0
9	furtună puternică	18,3—21,5	210 —280
10	furtună foarte puternică	21,6—25,1	290 —390
11	furtună excepțională	25,2—29	400 —580
12	uragan	>30	>580

Datorită faptului că presiunea exercitată de vînt în deschiderea conductorului este neuniformă, în calcule se ia o presiune medie

$$P_m = \alpha \cdot p, \qquad (6.11)$$

nde α este un factor de neuniformitate a cărui valoare variază între 1 entru $v \leqslant 20$ m/s și 0,7 pentru $v > 35$ m/s.

În acțiunea dinamică a vîntului fenomenele care au loc asupra conductoarelor electrice produc oscilația acestora. Prin îndoiri repetate se junge la obosirea materialului și la ruperea lui.

Principalele tipuri de oscilații, în funcție de amplitudinea și frecvența or sînt [6.3]:

— oscilație cu amplitudine mică (de ordinul 3—50 mm) și frecvență nare;

— oscilație cu amplitudine mare (0,3—10 m) și frecvență mică.

În ultimul caz fenomenul se mai numește și *dansul conductoarelor.*

Aceste oscilații provin [6.10] dintr-un regim turbionar ce se produce în spatele conductorului bătut de vînd (fig. 6.11). Aici se formează două vîrtejuri (*1* și *2* din fig. 6.11, *a*). Dacă aceste vîrtejuri nu se formează simultan, ceea ce este probabil în multe cazuri, ci alternativ (fig. 6.11, *b*), atunci aceste turbioane alternate produc asupra conductorului o forță perturbatoare armonică, de frecvență

$$f = 0{,}2\,\frac{v}{d}, \qquad (6.12)$$

unde v este viteza vîntului, în m/s, iar d este diametrul conductorului, în m.

Oscilațiile conductoarelor pot fi laterale-pendulare, transversale și longitudinale.

Oscilațiile laterale-pendulare au loc în jurul unei axe ce unește punctele de reazem ale conductorului.

Oscilațiile transversale au loc perpendicular pe direcția conductorului.

Oscilațiile longitudinale au loc în lungul conductorului.

Cele mai frecvente sînt primele două.

Măsurile care se iau împotriva acestor oscilații sînt antivibratoarele și conductoarele fasciculare.

În R.S.R. fenomenele cele mai dese de vibrație ale conductoarelor au fost observate în zona de sud-est a țării și în zona de munte.

Practic în toate țările au avut loc avarieri ale liniilor electrice aeriene, la viteze ale vîntului care au depășit vitezele de calcul. Aceste avarii sînt însă acceptate ca excepții, deoarece în alte condiții, liniile aeriene s-ar supradimensiona, costurile rezultate fiind mai mari decît costurile necesitate de eventuale remedieri.

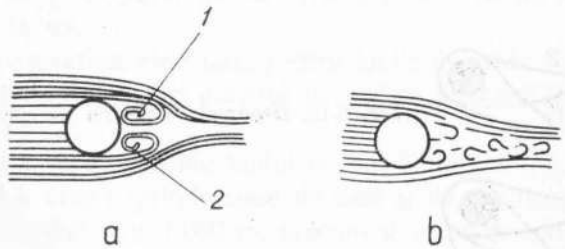


Fig. 6.11. Producerea oscilațiilor conductoarelor:
a — vîrtejuri simultane; *b* — vîrtejuri alternate.

6.4.5. Acțiuni ale depunerilor de chiciură

Depunerile de chiciură pe liniile electrice aeriene, se datorează vapo-ilor de apă cuprinși în atmosferă, care la temperaturi sub 0°C, în atin-ere cu conductoarele sau stîlpii se depun sub formă solidă.

Experiența acumulată în majoritatea țărilor au condus la stabilirea unei temperaturi de calcul de formare a chiciurei de —5°C, deși feno-menul s-a putut observa pînă la —30°C [6.11].

Fenomenul de formare a chiciurei pe conductoarele liniilor electrice aeriene este redat în fig. 6.12. În primele momente chiciura se depune pe conductor, după forma (*1*). Sub greutatea depunerilor neuniforme de chiciură, conductorul se rotește și oferă vîntului o nouă suprafață de depunere (*2*). O nouă rotire a conductorului, sub acțiunea greutății neu-niforme a chiciurei, conduce la depunerea stratului (*3*). Cu cît depunerile de chiciură au greutăți mai mari, cu atît conductoarele vor fi mai soli-citate mecanic.

Asemenea depuneri de chiciură, atît pe conductoarele liniilor cît și pe stîlpii metalici au condus la unele avarii.

Astfel, o linie de 220 kV care traversează un munte la o altitudine de circa 1 700 m a fost avariată prin ruperea conductoarelor și a părților superioare ale stîlpilor, ca urmare a depunerilor de chiciură care au atins pe conductoare grosimi de peste 30 cm.

O altă linie, de 110 kV, amplasată la o altitudine de circa 350 m, dar în apropierea unei acumulări mari de apă, cu direcția predominantă a

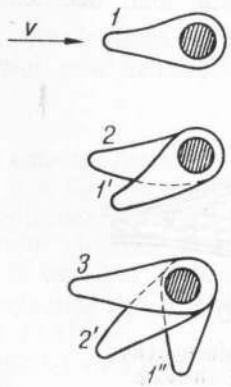


Fig. 6.12. Depunerea chiciurei pe conductoare.

vîntului dinspre acumulare spre linie, a fost scoasă din funcțiune, ca urmare a depunerilor masive de chiciură, care au deformat conductoarele.

Măsuri suplimentare de protejare a liniilor electrice aeriene, la depunerile de chiciură și de topire rapidă a ei în cazul cînd sînt condiții de formare, se iau și pe linie de proiectare și pe linie de exploatare.

În cazul unor zone predispuse la formarea chiciurei, se preferă așezarea orizontală a conductoarelor, ceea ce asigură distanțe mai mari ale conductoarelor deformate de chiciură față de alte elemente aflate sub tensiune sau legate la pămînt.

Pentru avertizarea începerii formării chiciurei pe conductoare se montează avertizoare de chiciură. Acestea sesizează eforturile mecanice suplimentare date de chiciură și le transmit sub formă de impulsuri la punctul de supraveghere.

Metodele de deschiciurare sînt mecanice sau electrice. Metodele mecanice se execută cu linia scoasă de sub tensiune și constau în scuturarea chiciurei, prin lovituri mecanice aplicate conductoarelor. Metodele electrice se bazează pe încălzirea electrică a conductoarelor, la temperatura de topire a chiciurei. În acest scop se utilizează scheme speciale, curentul fiind asigurat, fie din barele stațiilor, fie dintr-un generator retras din exploatare și pus să debiteze pe linia în cauză, care este în prealabil scurtcircuitată.

6.4.6. Prevederi de calcul pentru evitarea acțiunii diferenței de temperatură, a vitezei vîntului și a depunerilor de chiciură

Actele normative din R.S.R. [6.8 și 6.9] prevăd ipoteze de calcul bazate pe vînt și chiciură, iar ca elemente de corecție temperatura și înălțimea de la sol.

În baza măsurărilor efectuate, pentru liniile de peste 1 kV, teritoriul R.S.R. a fost împărțit, din punctul de vedere al solicitărilor probabile, în patru zone;

— zona I-a care cuprinde Sudul și Sud-Estul țării;
— zona I-b care cuprinde zona de deal și de munte pînă la altitudinea de 1 000 m, precum și întreaga zonă a Moldovei;
— zona II, care cuprinde Transilvania;
— zone cu altitudini peste 1 000 m.

Funcție de această zonare și de tensiunea liniilor, valorile care se iu în calcul pentru proiectarea și construcția liniilor aeriene cu tensiuni este 1 kV sînt redate în tabelul 6.5.

Tabelul 6.5

iteza vintului și grosimea depunerilor de chiciură luate ca ipoteze la calculul mecanic al liniilor aeriene peste 1 kV

Zona meteorologică	$Un \leq 110$ kV			$Un > 110$ kV		
	Vînt maxim	Vînt simultan cu chiciură		Vînt maxim	Vînt simultan cu chiciură	
	Viteza vîntului m/s	Viteza vîntului m/s	Grosimea stratului de chiciură în mm	Viteza vîntului m/s	Viteza vîntului m/s	Grosimea stratului de chiciură mm
-a	35	20	23	40	25	25
-b	30	15	17	38	20	23
I	27	13	13	35	17	20
peste 1 000 m altitudine	40	20	25	44	25	30

Pentru ipotezele de calcul ale liniilor aeriene sub 1 kV, teritoriul R.S.R. este împărțit în trei zone:

— zona I, cuprinde sudul și estul țării;

— zona II, cuprinde restul țării, delimitarea față de zona I-a fiind la limita dealurilor din Oltenia, Muntenia și Moldova;

— zona de munte, la altitudini care depășesc 1 000 m.

Funcție de această zonare, valorile care se iau în calcul pentru proiectarea și construcția liniilor aeriene de 380 V sînt redate în tabelul 6.6.

Tabelul 6.6

Viteza vintului și grosimea depunerilor de chiciură, luate ca ipoteze la calculul mecanic al liniilor aeriene sub 1 kV.

Zona meteorologică	Vînt maxim	Vînt simultan cu chiciură	
	Viteza vîntului m/s	Vizeza vîntului m/s	Grosimea stratului de chiciură mm
I	20	12	10
II	20	8	8
peste 1 000 m altitudine	25	12	13

Pentru toate cazurile temperaturile aerului ce se iau în considerare sînt redate în tabelul 6.7.

Tabelul 6.7

Temperaturi ale aerului luate în considerare la calculul liniilor electrice aeriene

Tensiunea liniei kV	Zona meteorologică	Temperatura, °C			
		Maximă	Minimă	Medie	De formare a chiciurei
1 kV	I	+40	−20	+15	−5
	II	+40	−20	+15	−5
	altid. > 1 000 m	+30	−30	+15	−5
> 1 kV	I a	+40	−30	+15	−5
	I b	+40	−30	+15	−5
	II	+40	−30	+15	−5
	altid. > 1 000 m	+40	−30	+15	−5

6.5. ALTE ACȚIUNI EXTERIOARE (DATORATE POLUĂRII, COROZIUNII, PERSONALULUI)

Independent de suprasolicitările electrice, termice și mecanice prezentate la subcap. 6.2, 6.3 și 6.4, instalațiile electrice sînt expuse și altor factori și anume: poluarea, coroziunea și acțiunile greșite ale personalului.

6.5.1. Poluarea izolației electrice

Izolația electrică este supusă, în timpul funcționării, influenței mediului înconjurător. În condițiile actuale de dezvoltare a industriei, datorită proceselor tehnologice din uzine-fabrici apar și emanații de gaze și de corpuri în suspensie, care se depun și pe suprafața izolatoarelor expuse în aer liber, influențînd negativ proprietățile electroizolante ale acestora.

Depunerile pot apare sub formă granuloasă sau electrolitică [6.12]. Poluarea granuloasă se datorează depunerilor de particule pulverulente, puțin solubile în apă (cenușe, praf de minereu, carbid, ciment ș.a.) care formează pe suprafața izolatoarelor un strat aderent. Acest strat reține apa, devenind bun conducător.

Poluarea electrolitică se datorează depunerilor de natură anorganică u gazelor, care în contact cu apa, formează soluții electrolitice, de emenea bune conducătoare.

Aceste depuneri apar în general combinate (granuloasă și electrolică). Ele se repartizează neuniform pe suprafața izolatorului, în funcție e forma izolatorului și de direcția predominantă a agenților poluanți. ensiunea electrică la care este supus izolatorul, prin intermediul elemenlor bune conducătoare, forțează trecerea unui curent de scurgere, a irui densitate este diferită între diversele zone de pe suprafața izolaorului.

n zonele în care densitatea curentului este mai mare se produce o ncălzire locală, care provoacă uscarea acestora. Se formează astfel, pe uprafața izolatorului, în timp, benzi uscate și benzi umede, care conduc o repartiție neuniformă a tensiunii electrice pe suprafața izolatorului. ind valoarea acestor diferențe de potențial depășește valoarea de ținere spațiului disruptiv, încep descărcările prin arc electric care șuntează pații (benzi) uscate. Descărcările prin arc electric sînt însoțite de vaații bruște ale curentului de scurgere, sub forma unor impulsuri. Căldura, ezvoltată de descărcările prin arc electric provoacă uscarea zonelor umede. stfel, zonele uscate se extind pe suprafețe din ce în ce mai mari, prooCînd extinderea în aceeași măsură și a descărcărilor prin arc electric, are în situația critică pot să se dezvolte, cuprinzînd întreaga lungime izolatoarelor și transformîndu-se în conturnare.

La acest proces contribuie și ionizarea aerului din jurul izolatorului, onizare provocată de descărcări.

Descărcările prin arc electric pot să dispară sau să evolueze pînă conturarea izolației, în funcție de conductivitatea peliculei electrolitice e pe suprafața izolatorului și de bilanțul procesului termoenergetic e pe izolator.

Din punctul de vedere al agenților poluanți, teritoriul R.S.R. cuprinde atru grade de poluare a zonelor [6.13]. Lungimea liniei de fugă minimă izolației depinde de aceste grade de poluare și de tipul instalațiilor lectrice (tabelul 6.8).

Numărul total al izolatoarelor în lanț se verifică prin comparareа ungimii de fugă specifice, cu valorile din tabelul 6.8, după formula:

$$\frac{Nl_c}{U_m} \geqslant \lambda_c, \qquad (6.13)$$

nde: N este numărul de izolatoare în lanț; l_c — lungimea drumului fectiv de scurgere, în cm pe element; U_m — tensiunea maximă de rviciu, în kV și λ_c — lungimea de fugă specifică minimă, în cm/kV, dicată în tabelul 6.8.

Tabelul 6.8

Lungimea liniei de fugă specifică minimă

Tipul zonei	Gradul de poluare al zonei	Lungimea de fugă specifică minimă, în cm/kV			
		Pentru linii electrice aeriene		Pentru echipamentul instalațiilor	
		110 — 400 kV	3 — 35 kV	110 — 400 kV cu neutrul legat la pămînt	3 — 35 kV cu neutrul izolat sau tratat
Nepoluată	I	1,5	1,7	1,55	1,7
Ușor poluată	II	2,0	1,7	1,8	1,8
Poluată	III	2,7	2,5	2,1	2,7
Intens poluată	IV	3,6	3,5	2,1*	2,7*

* Izolația se unge și cu vaselină siliconică sau minerală dacă este necesar.

Tabelul 6.9

Clasificarea zonelor poluate în funcție de gradul de poluare

Nr. crt.	Caracteristicile zonei		Distanța în m față de sursa de poluare	Gradul de poluare al izolației
1	Zone forestiere, montane, localități rurale sau urbane care nu au întreprinderi cu surse de poluare		—	I
2	Zone agricole		—	I
3	Zone mlăștinoase, cu ceață frecventă sau situate lîngă cursuri de ape		0 — 1,0 km	II
4	Triaje de căi ferate și traversări de linii ferate, cu tracțiune cu abur		limitată la zonă	II
5	Orașe mari, zone de trafic intens		idem	II
6	Instalații chimice	categ. A	>7,0 km	I
			3 — 7,0 km	II
			1,5 — 3,0 km	III
			0 — 1,5 km	IV
		categ. B	>3,0 km	I
			1,5 — 3,0 km	II
			0 — 1,5 km	III
		categ. C	>0,6 km	I
			0 — 0,6 km	II

În tabelul 6.9 s-au dat numai cîteva exemple de clasificare a zonelor poluate. Actele normative existente [6.13] stabilesc încadrări pentru toate zonele și industriile (zone marine, construcții de mașini, extracții ș.a.).

Principalele măsuri care se pot lua pentru prevenirea efectelor negative ale poluării asupra izolatoarelor sînt următoarele (în afara măsurilor care trebuie luate pentru limitarea sursei de poluare):

— alegerea din faza de proiectare a unor izolatoare speciale, cu linie de fugă corespunzătoare gradului de poluare al zonei;

— amplificarea izolației, ca urmare a experienței dobîndite în exploatare;

— spălarea periodică a izolației;

— ungerea izolației cu vaselină siliconică sau minerală, care împiedică formarea peliculelor electrolitice pe suprafețele izolatoarelor și deci apariția curenților de fugă.

6.5.2. Coroziunea instalațiilor electrice

Coroziunea reprezintă distrugerea metalelor sub acțiunea mediului înconjurător, printr-o serie de procese și schimbări chimice și electrochimice [6.14].

Din punctul de vedere al consecințelor, coroziunea poate fi generală, limitată sau prin puncte.

Viteza de corodare, în mm/an, a unui material este funcție de rezistența la coroziune a metalului în cauză. După GOST 5272-50 metalele se împart în șase grupe funcție de rezistența lor la coroziune (tabelul 6 10).

Tabelul 6.10

Gruparea metalelor funcție de rezistența lui la coroziune

Grupa	Caracterizarea rezistenței la coroziune a metalelor	Viteza de corodare, în mm/an
I	complet rezistent	$K \leq 0{,}001$
II	foarte rezistent	$0{,}001 < K \leq 0{,}01$
III	rezistent	$0{,}01 < K \leq 0{,}1$
IV	relativ rezistent	$0{,}1 < K \leq 1{,}0$
V	puțin rezistent	$1{,}0 < K \leq 10$
VI	nerezistent	$K > 10$

Viteza de corodare este influențată puternic de mediul în care este pus să lucreze metalul.

În tabelul 6.11 se indică viteza de corodare a principalelor metale utilizate în electrotehnică, în diferite medii.

Tabelul 6.11

Viteza de corodare (în mm/an) a principalelor metale utilizate în electrotehnică

Mediul coroziv	Metalul					
	Al	Zn	Pb	Fontă	Cu aliaje	Ag
Soluție acid sulfuric 5%	2,0–2,5	f. mare	0–0,05	0–0,1	0,05–1,25	0–0,02
Soluție acid acetic 5%	0,01–0,10	15–20	0,25–3,75	0–0,005	0,05–0,37	0,02
Soluție acid azotic 5%	0,37–2,0	f. mare	2,5–150	0–0,5	3,75–37,5	f. mare
Hidroxid de sodiu 5%	300–400	0,375–5,0	0,1–12,5	0–0,25	0,05–0,1	0,002
Apă	0,002	0,01–0,25	0,02–0,05	0–0,05	0–0,025	0,002
Apă de mare	0,025–1,25	0,01–0,25	0,005–0,37	0–0,07	0,005–0,37	0,002
Aer atmosferic	0–0,01	0–0,01	0–0,005	0–0,05	0–0,05	0,002

Comparînd metalele între ele rezultă că, cu excepția argintului, toate metalele sînt sensibile la acizi, aluminiul, zincul și plumbul la soluții alcaline (hidroxid de sodiu), iar aluminiul, plumbul și cuprul la apa de mare (comparativ cu acțiunea apei proaspete).

Principalele metale și materiale ale instalațiilor electrice supuse coroziunii sînt:

— cuprul, alama, aluminiul și oțelul zincat utilizate la fabricarea conductoarelor electrice aeriene;

— plumbul, utilizat la fabricarea cablurilor subterane;

— fonta, utilizată la fabricarea unor armături ale liniilor electrice aeriene și la manșoanele de legături ale cablurilor subterane;

— policlorura de vinil sau polietilena, utilizate drept înveliș protector al cablurilor subterane.

Analizînd comportarea acestor metale şi materiale la coroziune se ɔate forma o imagine mai clară a modului cum reacţionează diferite emente componente ale reţelelor electrice la coroziune.

Cuprul expus atmosferei formează la suprafaţa lui o serie de produse e coroziunii.

Funcţie de puritatea cuprului, viteza de înaintare a coroziunii în dirite medii, variază relativ puţin (tabelul 6.12).

Tabelul 6.12

Viteza de corodare, în mm/an la cupru şi alamă

Metalul	Atmosfera			
	Rurală	Urbană	Industr.	Marină
ıpru E 99,94%	1,9	2,9	4,0	3,9
ıpru 99,4% cu 0,5% As	1,6	2,5	3,6	3,2
ıpru 99,1% cu 0,8% Cd	2,0	2,8	4,1	3,7
ıpru 99% cu 0,7 Si	1,9	3,1	4,6	4,6
amă 70/30	2,1	4,0	5,2	3,7
amă 62/38	2,4	3,3	4,8	6,1

Coroziunea cuprului este influenţată mai mult sau mai puţin, funcţie de agentul ovocator al coroziunii. Astfel:

— hidrogenul sulfurat accentuează coroziunea în special în atmosfeă umedă;

— bioxidul de sulf, în condiţii de umiditate relativ mare a atmosferei (peste 75%), fluenţează puternic coroziunea;

— acidul clorhidric diluat conduce la formarea unui strat autoprotector, care piedică mai departe pătrunderea acidului, înspre cupru;

— acidul clorhidric sub formă de vapori atacă mai puternic cuprul decît zincul, r mai slab decît oţelul;

— atmosfera marină conduce la coroziunea mai pronunţată a cuprulni decît atsfera continentală, fapt evidenţiat de măsurările efectuate timp de 7 ani în zona calului Panama (fig. 6.13) din care rezultă că în atmosfera marină scădere a grosimii

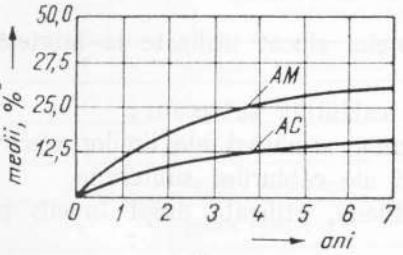


Fig. 6.13. Scăderea în timp a grosimii medii a cuprului, supus unei atmosfere marine (*AM*) şi unei atmosfere continentale (*AC*).

elementelor expuse (curba *AM*) a fost de cca. 3 ori mai mare decît a elementelor expuse în atmosferă continentală (curba *AC*);

— amoniacul, la cantităţile normal exstente în atmosferă, nu produce coroziuni;

— ploaia şi zăpada influenţează coroziunea prin faptul că dizolvă produsele solubile ale coroziunii, creind astfel alte spaţii proaspete supuse coroziunii.

Foarte importantă pentru continuitatea în funcţionarea instalaţiilor electrice este îmbinarea care trebuie efectuată între cupru şi aluminiu şi coroziunea intensă care se produce în zona de contact.

Coroziunea aluminiului este influenţată mai mult sau mai puţin, funcţie de agentul provocator al coroziunii. Astfel:

— atmosfera uscată şi ploaia nu accelerează coroziunea;

— acidul clorhidric, după un timp relativ scăzut (necesar dizolvării oxizilor formaţi pe suprafaţa aluminiului), intensifică procesul de coroziune;

— acizii propionic şi butinic, alcoolii etilici, butilic şi anilic, precum şi fenolul sub formă de anhidridă, atacă aluminiul în prezenţa apei;

— mortarele de var, betoanele din ciment Portland, mai ales în perioadele de priză ale acestora, pot conduce la coroziunea prin puncte a aluminiului;

— loviturile mecanice, zgîrieturile accelerează procesul de coroziune, prin deteriorarea stratului autoprotector de oxid de aluminiu.

Mai puţin decît în contactul cu cuprul, aluminiul în contact cu oţelul, în prezenţa apei, conduce totuşi la coroziuni accentuate.

Coroziunea oţelului zincat (în principal deci a zincului) este de asemenea influenţată mai mult sau mai puţin de natura agentului provocator al coroziunii. Astfel:

— zonele marine şi tropicale accentuează coroziunea;

— gazele sulfuroase şi praful, provenit din combustia păcurei, accentuează de asemenea coroziunea zincului;

— oxigenul produce coroziunea prin puncte a zincului;

— apele moi atacă cu o intensitate deosebită zincul, în timp ce apele uzuale sau dure pot lăsa zincul neatacat sau în cel mai rău caz să-i provoace o coroziune prin puncte;

— mediile calde şi umede provoacă o coroziune accentuată a zincului;

— în contact cu cuprul sau fierul şi în prezenţa acidului sulfuric coroziunea zincului este mai puternică, în timp ce prezenţa aluminiului diminuează mult fenomenul de coroziune.

Tocmai pentru calităţile sale rezistive la coroziune, conductoarele din oţel se protejează prin zincare (în condiţii egale, oţelul zincat se comportă de circa 5 ori mai bine decît oţelul neprotejat).

Coroziunea plumbului variază, funcţie de agenţii exteriori, după cum urmează:

— solul influenţează direct coroziunea plumbului în funcţie de natură şi compoziţie, coroziuni mai accentuate putînd fi provocate de soluţii de bioxid de calciu saturate cu oxigen sau de clorură de sodiu saturată;

— apa de mare corodează moderat plumbul, cu o iuţeală de aproximativ 4,7 mg/dm²/zi;

— apa nu atacă plumbul, dar o combinaţie de aer-apă îl corodează puternic;

— acidul acetic accelerează coroziunea;

— calcarul de asemenea poate accelera coroziunea.

Din cauza pasivităţii generale a plumbului la agenţii exteriori, plumbul a fost utilizat pe scară largă la execuţia mantalelor cablurilor subterane.

Totuși dacă mantalele de plumb ale cablurilor subterane se comportă foarte bine la factorii fizico-chimici externi, nu același lucru se poate spune despre coroziunea lui datorată curenților de dispersie, care apar în zonele unde se utilizează curentul continuu pentru tracțiunea electrică cu închiderea circuitului prin șine (fig. 6.14).

Curentul continuu necesar tracțiunii electrice, produs de stația de alimentare (*1*), parcurge traseul prin firul de cale (*2*), vagonul (*3*), iar de aci, funcție de rezistivitatea solului, se derivă în paralel, curentul I_s reîntorcîndu-se prin șinele metalice (*4*), curentul I_{d1} prin pămînt, iar curentul I_{d2} prin mantaua de plumb și cea de protecție mecanică a cablului (*5*) întîlnit pe traseu.

În zona anodică a cablului apar coroziuni de tip electrolitic, cu atît mai accentuate, cu cît densitatea curentului pe suprafața zonei anodice (*Z*) este mai mare.

Coroziunea fontei este destul de redusă. Fonta aliată devine foarte rezistentă la acizi, dar devine mai sensibilă la soluții alcaline. Fonta utilizată pentru manșoanele de legătură ale cablurilor electrice cuprinde elemente structurale din fier-carbon, fier siliciu și fier fosfor și ferită, primele fiind foarte rezistente la coroziune.

În general manșoanele de legături din fontă nu pun probleme deosebite de coroziune, ca de altfel nici armăturile liniilor electrice aeriene.

Coroziunea policlorurei de vinil nu are loc dacă mediul înconjurător respectă anumite condiții, așa cum sînt :

— soluri cu conținut de substanțe azotoase de max. 0,001% ;
— apă de mare cu un conținut de humus max. de 20 mg/l și *p*H cuprins între 6,5 și 7,4 ;
— ape freatice cu un conținut de humus de max. 40 mg/l și *p*H cuprins între 6,0 și 8,2 ;
— mlaștini cu conținut de humus de max. 40 mg/l și *p*H de pînă la 8,2.

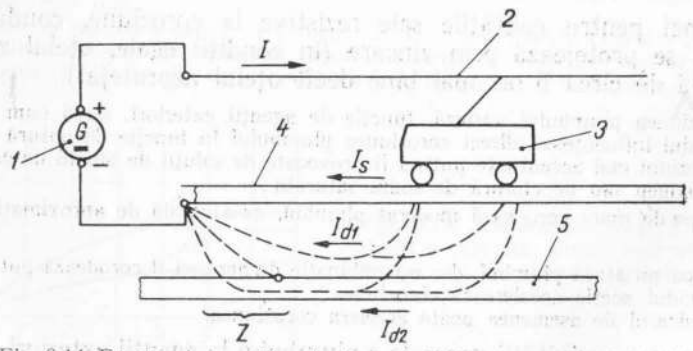


Fig. 6.14. Formarea curenților de dispersie la instalațiile de tracțiune, în curent continuu, cu întoarcerea curentului prin șine.

De asemenea policlorura de vinil se poate utiliza în bune condiții în medii acide sau bazice ale căror concentrații nu depășesc 60%.

Coroziunea polietilenei are loc în special dacă mediul înconjurător :
— este puternic infestat cu solvenți organici (benzen, fenoli, cloroform ș.a.) ;
— conține ozon în cantități ridicate ;
— depășește temperatura de 60°C.

Pentru prevenirea procesului de coroziune se iau măsuri, dintre care se citează :

— eliminarea sau reducerea surselor care produc coroziunea, măsură care se ia în general de industriile producătoare de reziduri cu acțiuni corozive ;

— metalizarea elementelor (de exemplu zincarea stîlpilor metalici din oțel ai liniilor electrice aeriene sau metalizarea cu aluminiu a benzilor de oțel care protejează mecanic cablurile electrice) ;

— tratarea chimică a elementelor, în vederea nivelării suprafeței și asigurarea aderenței necesare vopselei anticorozive, operațiile de tratare fiind fosfatarea sau cromatizarea, aplicate pe suprafețele metalice ;

— protecțiile catodice, care se aplică în cazurile în care apar curenți de dispersie.

În instalațiile electrice, în ultima perioadă, au apărut materiale noi, așa cum sînt ROM—COR și CIH—COR, care înlocuiesc oțelul zincat sau vopsit pentru fabricarea stîlpilor metalici. Aceste noi aliaje de oțel, prin coroziunea inițială care apare, își formează un strat autoprotector, care evită în continuare producerea coroziunii.

6.5.3. Exemple de poluare și coroziune ale instalațiilor electrice și măsurile luate

Cele mai frecvente cazuri de poluare și de coroziune apar la instalațiile centralelor electrice, amplasate în apropierea uzinelor chimice, metalurgice sau a exploatărilor miniere. În aceste condiții instalațiile electrice sînt supuse agenților poluanți și corozivi produși atît de centrală cît și de industria din apropiere.

Centralele electrice cele mai mari producătoare de agenți poluanți și corozivi sînt în ordine, în funcție de combustibilul utilizat : cele pe păcură (cu conținut ridicat de sulf), pe cărbune și pe gaz metan.

Industriile cele mai mari producătoare de agenți poluanți și corozivi sînt în ordine : industria chimică, fabricile de ciment și industria metalurgică.

Exemplul 6.3. Astfel, la o centrală electrică se utilizează drept combustibili lignit cu 2—4% sulf și păcură cu 1% sulf, iar în imediată apropiere se află un combinat de alumină. Aceste două unități produc agenți poluanți și corozivi compuși din : cenușe și pulbere de cărbune, bioxid de sulf și pulbere de Al_2O_3.

Consecințele acestor agenți sînt poluarea izolației electrice precum și coroziunea ntuată și rapidă a părților metalice și în special a tablelor.

S-au luat ca măsuri curățarea și ungerea periodică a izolației electrice cu vaselină onică, ungerea periodică a contactelor electrice cu vaselină neutră, înlocuirea perioi a tablelor de protecție și vopsirea periodică cu vopsea anticorozivă a părților me-ce.

Exemplul 6.4. O altă centrală electrică utilizează drept combustibili cărbune lignit 1% sulf, iar în imediată apropiere se află un combinat chimic.

Agenții poluanți și corozivi produși de aceste două unități sînt amoniacul, oxidul ioxidul de azot, pulberea și cenușa de cărbune și oxidul de sulf. Consecințele acestor nți sînt murdărirea și poluarea izolației electrice, murdărirea și coroziunea stîlpilor iglelor din beton armat, coroziunea contactelor electrice ale separatoarelor, șirurilor cleme și releelor de protecție, precum și coroziunea tablei zincate.

S-au luat ca măsuri curățarea și ungerea periodică a izolației electrice cu vaselină onică, ungerea contactelor electrice cu vaselină neutră, curățarea periodică a prai depus, precum și curățarea, buceardarea și alăptarea cu ciment a fisurilor apărute construcțiile din beton.

Exemplul 6.5. Un al treilea exemplu este al unei centrale electrice care utilizează ot combustibil lignit cu cca. 2% sulf, iar în apropiere se află o fabrică de ciment și o ieră de calcar.

Agenții poluanți și corozivi constatați sînt cenușa și pulberea de cărbune, oxidul de precum și pulberile alcaline de calcar și ciment. Consecințele acestor agenți sînt uarea izolației, precum și murdărirea și coroziunea contactelor electrice ale separarelor și releelor de protecție.

S-au luat ca măsuri înlocuirea periodică a izolației și ungerea ei cu vaselină silicică, ungerea contactelor electrice cu vaselină neutră, precum și curățarea periodică rafului din camerele de comandă și din dulapurile releelor de protecție.

6.5.4. Mecanizarea lucrărilor de spălare și de ungere cu unsoare a izolației electrice

Spălarea periodică a izolației din stațiile de transformare exterioare, ouse poluării compuse din granule de cărbune sau de sare se poate ecuta fie prin instalații fixe de spălare, montate în stație, fie prin talații mobile, care pot fi deplasate de la o celulă la alta.

O instalație fixă de spălare periodică a izolației cuprinde: o sursă de ă, o instalație de demineralizare a apei, o cameră de comandă autotă a procesului de spălare, țevi de legătură pentru circulația apei pe itoriul stației și în jurul fiecărui echipament electric de comutație mară, țevi și diuze de dirijare a apei pe izolatoare.

O instalație mobilă de spălare a izolației cuprinde un cărucior mobil o electropompă, furtun și o cușcă de ecranare electrică a personalului nevrant.

Spălarea se execută cu instalațiile sub tensiune, la periodicități stabilite pe baza experienței de exploatare.

Spălarea și reînnoirea stratului de vaselină se poate efectua la locul de montaj al instalațiilor electrice sau în ateliere utilate special în acest scop. Prima posibilitate se utilizează la echipamentele electrice (descărcătoare, transformatoare, întreruptoare, separatoare), iar cea de-a doua la izolatoarele care pot fi ușor demontate și remontate în instalații.

Spălarea (degresarea) părților electroizolante ale echipamentelor electrice se execută cu ajutorul unui furtun special prin care se poate supune partea unsă, unui jet de apă leșioasă sub formă de aburi, în cazul unsoarei „Otina C." sau de apă încălzită la 80°C pentru unsoarea siliconică.

Ungerea (gresarea) părților electroizolante ale echipamentelor electrice se execută cu ajutorul unui compresor — pistol special, care pulverizează vaselina pe suprafața electroizolantă. Aparatul execută pulverizarea vaselinei de așa manieră, încît stratul de vaselină care se depune pe izolator să nu conțină bule de aer.

Izolatoarele ușor transportabile se spală de vaselina îmbibată cu agenți poluanți și se ung cu un strat de vaselină proaspăta, în ateliere special amenajate.

Pentru transportul de la și spre locul de montaj al lanțurilor de izolatoare se utilizează rasteluri metalice (fig. 6.15), în care se fixează lanțurile de izolatoare, rasteluri care se pot suprapune în timpul trans-

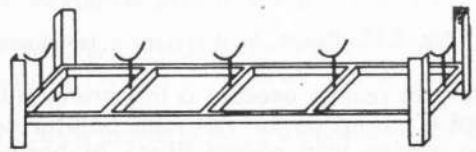


Fig. 6.15. Rastel metalic pentru transportul lanțurilor de izolatoare unse cu vaselină.

portului, menținînd prin construcția lor, o distanță convenabilă între lanțurile suprapuse. Fiecare rastel de acest gen poate susține un lanț complet de izolatoare, ele fiind dimensionate pentru lungimi diferite ale lanțurilor.

Atelierele pentru tratare cu vaselină cuprind în flux tehnologic încăperi speciale pentru: degresare, uscare, încercări profilactice, gresare și depozitare.

Instalația de degresare (fig. 6.16) este compusă dintr-o etuvă (*1*) i o motopompă de circulație (*2*) a soluției degresante. Etuva cuprinde ı ușă de vizitare (*3*), un bazin (*4*) cu soluție degresantă, care se în-ălzește cu rezistențele electrice (*5*) la o temperatură de 90°C. Soluția legresantă este preluată de motopompa (*2*), împreună cu dispozitivul

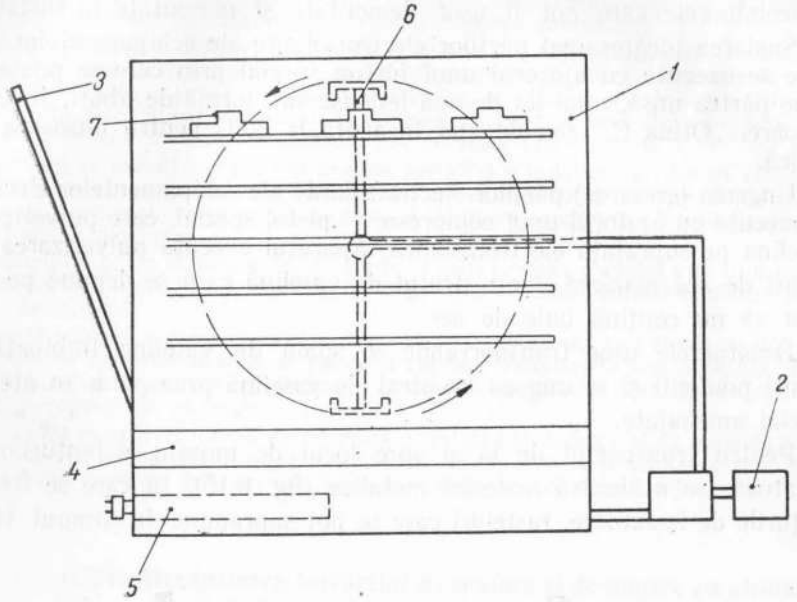


Fig. 6.16. Etuvă de degresare a izolatoarelor.

cu diuze (*6*), care prin reacție execută o mișcare circulară în jurul rastelor cu izolatoare (*7*) timp de 15—20 min. Soluția degresantă după ce spală izolatoarele, revine prin cădere liberă în bazinul (*4*). După spălare și uscare izolatoarele străpungibile curate se supun unei probe profilactice de tensiune alternativă mărită, în laborator. Cele care corespund acestei probe sînt reunse cu vaselină. Spațiul destinat reungerii, cuprinde baia de vaselină. O asemenea baie este indicată în fig. 6.17. Vaselina introdusă în cuva (*1*) se încălzește cu rezistențele electrice (*2*) la circa 80°C. În capul dispozitivului de manevrare (*3*), care poate executa o mișcare de rotație în jurul punctului fix (*o*) și o mișcare de deplasare în plan vertical, se fixează un izolator (*4*), dispozitivul fiind în poziția *A*. Apoi rotind în jurul axei sale izolatorul cu ajutorul dispozitivului de manevrare (*3*), se aduce izolatorul în poziția *B*, scufundîndu-l în baia de vaselină și continuînd rotirea, se ridică din nou în

poziția *A* unde se rotește un scurt timp pînă la solidificarea vaselinei pe izolator.

Apoi se formează lanțuri de izolatoare unse cu vaselină proaspătă, care se fixează în rastelele indicate în fig. 6.15.

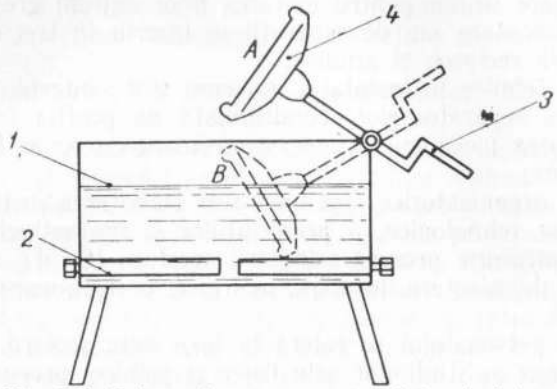


Fig. 6.17. Baie pentru ungerea mecanică a izolatoarelor cu vaselină siliconică.

Există și mașini complexe de spălare și reungere a lanțurilor de izolatoare, care efectuează complet automatizat operațiile de spălare, uscare și ungere a lanțurilor complete.

6.5.5. Acțiunile greșite ale personalului

În timpul exploatării instalațiilor electrice apar și situații nedorite de avarii datorate acțiunilor greșite ale personalului de exploatare sau reparație.

Deși comparativ cu numărul de incidente și avarii datorate altor cauze, aceste avarii sînt relativ reduse, totuși ele sînt deosebit de grave prin consecințele pe care le pot avea asupra instalațiilor, consumatorilor și chiar a personalului în cauză, ultimii fiind expuși consecințelor arcului electric sau exploziilor de echipamente.

Avariile datorate acțiunilor greșite ale personalului au următoarele prilejuri :

— deschiderea sub sarcină a separatoarelor ;

— punerea sub tensiune a unor elemente de instalații scurtcircuitate și legate la pămînt ;

— reglaje incorecte ale protecției prin relee ;

— acționarea eronată a protecțiilor prin relee în timpul verificării funcționării acestora ;

— nerespectarea tehnologiilor de reparaţie a instalaţiilor electrice.
Alături de aceste acţiuni greşite ale personalului de exploatare şi araţie apar, în unele cazuri, avarii şi din cauza greşelilor de proiectare :onstrucţie ale instalaţiilor electrice, care se consideră de asemenea, acţiuni greşite ale personalului.
Măsurile care se iau pentru evitarea unor acţiuni greşite ale perso-ului de exploatare sau de reparaţii se înscriu în trei categorii, care completează reciproc şi anume :
— măsuri tehnice în instalaţii, aşa cum sînt : interblocarea electrică manevrarea separatoarelor, condiţionată de poziţia întreruptorului, interblocarea mecanică a unor separatoare cu separatoarele de pu-e la pămînt ;
— măsuri organizatorice, aşa cum sînt elaborarea instrucţiunilor in-ne, a fişelor tehnologice, a prescripţiilor şi normativelor şi crearea rului organizatoric necesar asimilării acestora [6.15] ;
— măsuri de selectare, formare, instruire, perfecţionare şi promovare ersonalului.
Selectarea personalului se referă la faza ante şcolară, în care can-atul, pe baza aptitudinilor sale fizice şi psihice, precum şi a cunoş-elor sale generale, este îndrumat înspre anumite grupuri de speciali-(de ex. electroenergetice, termoenergetice ş.a.).
Formarea personalului se referă la perioada sa de şcolarizare, de asi-are a cunoştinţelor practice şi teoretice, necesare meseriei.
Instruirea şi perfecţionarea personalului se referă la asimilarea cu-ştinţelor specifice în timpul producţiei, ambele fiind reglementate prin normativ [6.16].
Promovarea personalului se referă la avansarea acestuia în clase sau egorii superioare de retribuţie, pe baza cunoştinţelor dobîndite şi a ultatelor obţinute în procesul de producţie. Promovarea personalului e de asemenea reglementată prin act normativ [6.17].
În acest cadru larg şi complex a muncii cu personalul, două feno-ne prezintă un caracter general, şi anume : fenomenele de perimare de memorie.
Fenomenul de perimare apare atunci cînd un lucrător face uz de ncte de vedere, tehnici sau teorii, care sînt mai puţin eficiente în olvarea problemelor puse de postul în care lucrează, decît cele mai nsate existente în domeniul respectiv [6.18]. Gradul de perimare) a cunoştinţelor poate fi definit de următoarea formulă :

$$G_p = \left(1 - \frac{N_{cp}}{N_{ce}}\right) 100, \qquad (6.14)$$

care : N_{cp} este nivelul de cunoştinţe al lucrătorului în disciplina res-tivă, iar N_{ce} este nivelul maxim al cunoştinţelor existente în disci-na respectivă.

Acest grad de perimare este foarte diferit de la un individ la altul.
Fenomenul memoriei arată că restudierea ulterioară a unui material memorat anterior, reclamă mai puţin timp decît cel utilizat la prima asimilare [6.19]. Este dovedit, că nu se uită niciodată nimic, ci numai nu ne putem aduce întotdeauna aminte. Totodată s-a stabilit şi o curbă (fig. 6.18) din care rezultă că materialele semnificative (*1*) se menţin un timp mai îndelungat la suprafaţa memoriei, decît cele nesemnificative (*2*).
Aceste fenomene explică în fond necesitatea reciclării cunoştinţelor personalului.
În procesul de selectare, formare, instruire şi perfecţionare cît şi pentru stabilirea şi controlul periodic al calităţilor psiho-aptitudinale, în sistemul energetic se aplică metode noi de asimilare şi verificare a cunoştinţelor aşa cum sînt : verificarea cunoştinţelor prin metoda testelor, testarea psiho-aptitudinală, exerciţiile de avarii şi lucrările model.
Verificarea cunoştinţelor prin metoda testelor, constă în completarea de către lucrătorul examinat a unui chestionar cu întrebări şi cu trei răspunsuri la fiecare întrebare, din care numai unul este cel exact. Răspunsurile considerate inexacte se şterg de către cel examinat. O metodă mai evoluată o reprezintă camera de examinare prin metoda testelor [6.15], care se desfăşoară într-o sală cu bănci în care stau lucrătorii supuşi examinării şi un panou central luminos pe care apar înscrise, pe rînd, întrebările puse şi cele trei răspunsuri. Fiecare bancă are pe pupitru trei butoane corespunzătoare celor trei răspunsuri. La apariţia pe ecran a întrebării, lucrătorii examinaţi apasă pe unul din cele trei butoane, după care, urmează a doua întrebare. La terminarea tuturor

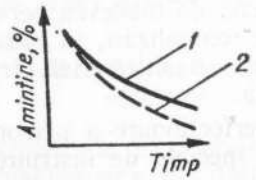


Fig. 6.18. Curba reţinerii în memorie a materialelor semnificative şi a celor nesemnificative.

întrebărilor pe panoul central, la comanda electrică dată de instructor, apare simultan pentru toţi participanţii, numărul de ordine al întrebărilor şi al răspunsurilor date.
Testarea psiho-aptitudinală constă într-o discuţie prealabilă a psihologului cu lucrătorul în cauză din care psihologul îşi formează o părere generală privind temperamentul lucrătorului. Apoi se trece la examinarea propriu-zisă, pentru care se utilizează în principiu două metode :
— metoda testelor creion-hîrtie ;
— metoda testelor prin aparate.

În ambele cazuri, printr-o examinare a unui număr mare de subiecți, stabilit pentru fiecare test creion-hîrtie sau pentru fiecare aparat de tare, valoarea medie a performanțelor pentru lucrătorii de o anumită ecialitate. Cu această valoare se compară rezultatele subiectului analizat. Exercițiile de avarii se pot desfășura fie direct în instalații, fie în elierele de antrenament.

Direct în instalații, de exemplu, se dă tema apariției unui defect pe inie aeriană de înaltă tensiune. Instructorul fixează în prealabil, prino plăcuță, stîlpul unde se simulează existența defectului. Echipele eacă în control, supraveghează linia și raportează toate constatările cute. Se notează duratele de rezolvare a supravegherii, calitatea acestora se compară cu instrucțiunile elaborate.

În atelierele sau poligoanele de antrenament se execută lucrări spece. De exemplu în ateliere se execută lucrări de manșoane și cutii rminale la cabluri subterane iar în poligoanele exterioare de antrenent se execută operații specifice liniilor electrice aeriene.

Lucrările model constau în pregătirea și executarea unor lucrări de tre o echipă. La executarea ei participă și alte echipe care urmăresc odul de executare. În final se face critica lucrării și se stabilesc mările necesare pentru îmbunătățirea modului de lucru.

Un caz particular al atelierelor de antrenament îl reprezintă simulaul de manevre. Acesta redă fidel camera de comandă și de conexiuni medie tensiune a unei stații de transformare, cu toate funcționalitățile fie efectiv montate așa cum sînt protecțiile prin relee și semnalizările eventive sau de avarie, fie simulate, așa cum ar fi montarea scurtcuitoarelor mobile sau fixe. Panoul de comandă cuprinde suplimentar un analizor final care funcție de greșelile efectuate de manevrant îi abilesc calificativul. Instructorul dă o temă de manevră personalului, u provoacă direct în instalație o serie de semnalizări, în baza cărora, tr-un timp predeterminat, personalul care se antrenează, trebuie să interpreteze și să acționeze în consecință.

Acest întreg complex de instruire și perfecționare a personalului a ndus la necesitatea creării unor centre speciale de instruire și perționare a personalului.

Un asemenea centru cuprinde:

— spații pentru cazarea personalului;

— spații pentru asigurarea activităților sociale;

— spații pentru săli de cursuri, ateliere de antrenament, camere de stare, simulatoare de manevre, săli de proiecție, ateliere de cabluri ș.a.;

— poligoane de antrenament în aer liber în care sînt construite stalații la dimensiuni reale, ca și instalații — pitic (de exemplu numai rtea superioară a liniilor electrice aeriene);

— spații deschise pentru sport și parcuri de odihnă.

În general, dată fiind dotarea complexă a unor asemenea centre de antrenament este de preferat ca acestea să fie specializate pe diferite tipuri de instalații și anume:

— instalații de distribuție aeriană de medie și joasă tensiune;

— instalații de cabluri subterane;

— instalații de transport de înaltă tensiune (linii aeriene și stații de transformare);

— instalații specifice automatizărilor și protecțiilor prin relee.

Pentru ușurarea efortului financiar și utilizarea mai bună a spațiilor, asemenea centre de instruire și perfecționare sînt amplasate în imediata apropiere a grupurilor școlare energetice și a laboratoarelor de psihologie profesională.

6.6. MENTENANȚA INSTALAȚIILOR ELECTRICE

Mentenanța reprezintă totalitatea acțiunilor planificate și neplanificate de control, testare, întreținere și reparare, efectuate asupra unei instalații în vederea obținerii unui nivel de siguranță dat [6.20]. Sînt definite două genuri de mentenanță:

— mentenanța preventivă, cu scop principal de reducere a riscurilor de producere a unui defect, în special prin acțiuni de încercări profilactice (testare), de schimbare a unor piese supuse uzurii, de revizii și reparații planificate ș.a.;

— mentenanța corectivă, cu scopul principal de înlăturare imediată a funcționărilor defectuoase sau avariilor.

În mentenanță se încadrează activitățile de exploatare, întreținere, reparare și probe profilactice.

6.6.1. Exploatarea și întreținerea-repararea instalațiilor electrice

Activitatea de exploatare este complexul de lucrări prin care se asigură funcționarea instalațiilor electrice, în scopul alimentării consumatorilor cu energie electrică la un grad optim de siguranță și la parametri normali [6.21]. Ea cuprinde:

— lucrări operative (de intervenție) L.O. prin care se realizează supravegherea, controlul, urmărirea regimului de funcționare și înlăturarea imediată a eventualelor incidente, avarii sau deranjamente;

— lucrări curente, L.C. prin care se realizează periodic, verificări, curățiri, eliminări ale unor defecțiuni mici.

Activitatea de întreținere-reparare este complexul de lucrări ce se execută cu periodicități prestabilite, pentru a menține instalațiile elec-

ice în bună stare de funcționare, pe toată durata de viață normată. a cuprinde :

— *revizia* (revizia tehnică) (R.T.) prin care se execută la periodicități estabilite, verificări, curățirea și înlocuirea unor subansamble ;

— *reparația curentă* (R.C.) prin care se execută lucrări de un volum ai mare, a căror necesitate s-a constatat cu ocazia reviziei ;

— *reparația capitală* (R.K.) prin care se execută lucrări de readucere instalațiilor cît mai aproape de caracteristicile tehnice inițiale sau de ibunătățire a acestora.

Din punct de vedere valoric costurile raportate la valoarea mijlolului fix supus reviziei sau reparării, nu depășesc 2—3% din cazul reziilor, 15% în cazul reparațiilor curente și 60—65% în cazul reparailor capitale.

Periodicitatea executării lucrărilor (cu excepția celor de intervenție) ste normată. În tabelul 6.13 se prezintă pentru exemplificare la cîteva enuri de instalații electrice, periodicitățile stabilite.

Tabelul 6.13

eriodicități normate, în activitatea de exploatare și întreținere-reparare a instalațiilor electrice

Denumirea instalației	Periodicitatea normată în lucrări/an			
	L.C.	R.T.	R.C.	R.K.
tații de transformare fără personal de exploatare în tură	24/1	1/1	1/6	1/12
ransformatoare de forță	—	1/1	1/6	1/12
osturi de transformare aeriene	1/1	1/2	1/6	1/12
inii electrice aeriene 220—400 kv metal	1/1	1/2	1/6	1/25
inii electrice aeriene 35—110 kV, metal sau beton	1/1	1/2	1/6	1/25
inii electrice aeriene 1—20 kV metal sau beton	1/1	1/2	1/6	1/25
inii electrice aeriene sub 1 kV beton	1/1	1/2	1/6	1/25
inii electrice subterane 60—220 kV	4/1	1/2	1/8	1/15
inii electrice subterane sub 1 kV	1/1	—	—	1/15
nstalații de iluminat public	8/1	1/2	1/6	1/

6.6.2. Principalele probe și încercări ale izolației electrice

Probele și încercările profilactice pentru fiecare echipament, utilaj sau instalație electrică sînt stabilite fie prin recomandări internaționale CEI, fie prin acte normative naționale, așa cum sînt de exemplu GOST pentru U.R.S.S., VDE pentru R.F.G. și STAS pentru R.S.R., fie prin norme interne departamentale (NID), caiete de sarcini (CS) sau condiții tehnice (CT). În afara acestora, care sînt obligatorii, atît furnizorul, cît și beneficiarul mai execută o serie de probe și încercări pentru a testa calitatea produselor care compun instalațiile electrice [6.22].

În stabilirea și urmărirea rezultatelor probelor și încercărilor profilactice, colaborarea între furnizor și beneficiar prezintă o mare importanță, interesul și scopul final urmărit fiind comun : creșterea fiabilității echipamentelor și instalațiilor.

În principiu din punct de vedere calendaristic, probele și încercările profilactice ale echipamentelor și instalațiilor electrice, care au intrat deja în producția de serie, au următoarele etape :

— probele de serie și de lot, care se execută la furnizor cu participarea grupei de recepție a beneficiarului ;

— probele echipamentului și instalațiilor care se execută în faza de montaj, pe subansamble ;

— probele din perioada de punere în funcțiune și de exploatare de probă, care se execută asupra întregului complex de instalații, cu scopul de a se verifica funcționarea instalațiilor.

— probele din perioada de exploatare, efectuate atît în etapa de atingere a parametrilor proiectați cît și în perioada de exploatare continuă a instalațiilor, incluzînd în acestea și perioadele de revizii și reparare ale instalațiilor.

Probele și încercările caracteristice instalațiilor electrice se referă la izolația electrică.

6.6.3. Măsurarea rezistenței de izolație și a coeficientului de absorbție

Încercările instalațiilor electrice cu tensiune continuă se caracterizează prin valoarea tensiunii aplicate și durata de aplicare.

Influența valorii tensiunii continue aplicate este ilustrată în fig. 6.19. În funcție de tensiunea aplicată (U), valoarea rezistenței de izolație (R_{iz}), are la început o tendință de creștere, pînă la valoarea critică a tensiunii (U_{cr}), după care scade, pentru ca la tensiunea de străpungere (U_{str}) să ajungă brusc la zero [6.22].

În funcție de tensiunea nominală a instalațiilor sau aparatelor electrice, ıtru măsurarea rezistenței de izolație se utilizează megohmmetre de)—1 000—2 500 și 5 000 V.

Durata aplicării tensiunii influențează de asemenea valoarea rezistenței izolație, datorită fenomenului de polarizare și încălzire a dielectricu-

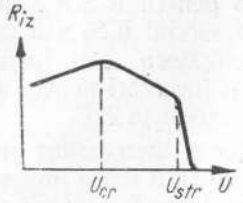


Fig. 6.19. Variația rezistenței de izolație (R_{iz}), în funcție de valoarea tensiunii continue aplicate (U).

. În cadrul măsurărilor, se iau în considerare valorile rezistenței de laţie măsurate la 60 s și la 15 s de la aplicarea tensiunii. Raportul :stora se numește *coeficient de absorbție* și trebuie să fie mai mare decît ınumită valoare rezultată din experiența de exploatare.

Un al treilea element care influențează valoarea rezistenței de izola- este temperatura dielectricului. Cu cît temperatura este mai mare atît rezistența de izolație este mai mică.

Valorile acceptate ale rezistenței de izolație și ale coeficientului de sorbție depind de tipul aparatului electric și sînt prescrise prin acte rmative [6.23].

Pentru generatoare și compensatoare sincrone, încercarea se efectuză cu megohmmetrul, a cărui tensiune depinde de tensiunea nominală mașinii (tabelul 6.14).

Tabelul 6.14

ensiunea nominală a megohmmetrului de încercare, funcție de tensiunea nominală a mașinii

Tensiunea nominală a înfășurării V	Tensiunea nominală a megohmmetrului V
≤500	500
500—3 000	1 000
>3 000	2 500

Se urmărește îndeplinirea a două condiții :

— rezistența de izolație să nu fie mai mică decît o anumită valoare ;

— coeficientul de absorbție să fie mai mare sau cel puțin egal cu 1,3.

Rezistența de izolație după 60 s funcție de tensiunea nominală a mașinii și puterea acesteia, trebuie să respecte relațiile :

— pentru mașini cu tensiunea nominală a înfășurării mai mică de 1 000 V

$$R_{iz\ (75°C)} > 1\ M\Omega\ ; \tag{6.15}$$

— pentru mașini cu tensiune nominală a înfășurării mai mare de 1 000 V

$$R_{iz\ (75°C)} > \frac{U_n}{1000 + \frac{S_n}{100}} \tag{6.16}$$

În relațiile (6.15) și (6.16) $R_{iz\ (75°C)}$ este rezistența de izolație la temperatura de 75°C, în M Ω, U_n este tensiunea nominală a mașinii, iar S_n este puterea nominală aparentă a mașinii.

Rezistența de izolație nu poate fi măsurată la temperatura exactă de 75°C, ci la o temperatură oarecare t. Recalcularea ei se face cu formula :

$$R_{iz\ (75°C)} = \frac{R_{izt}}{K} \tag{6.17}$$

unde K este un coeficient de temperatură, a cărui valoare depinde de temperatura t la care se execută măsurarea (fig. 6.20).

Coeficientul de absorbție (K_{abs}), care arată gradul de umiditate al izolației mașinii, trebuie să respecte relația :

$$K_{abs} = \frac{R_{iz(60s)}}{R_{iz(15s)}} \geqslant 1{,}3. \tag{6.18}$$

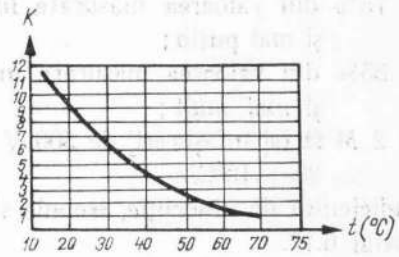


Fig. 6.20. Coeficientul K în funcție de temperatură la care se execută măsurătoarea rezistenței de izolație.

Pentru transformatoarele de putere, autotransformatoare, bobine e compensare și bobine de stingere, măsurarea rezistenței de izolație a coeficientului de absorbție se efectuează cu megohmmetrul, a cărui ensiune nominală depinde de tensiunea nominală a înfășurării (tabelul 15).

Tabelul 6.15

ensiunea nominală a megohmmetrului de încercare, în funcție de tensiunea nominală a înfășurării

Tensiunea nominală a înfășurării V	Tensiunea nominală a megohmmetrului V
≤500	1 000
>500	2 500

Dacă măsurarea se efectuează la o altă temperatură decît cea avută n fabrică, atunci rezistența de izolație măsurată după 60 s va fi recalculată u un coeficient K, în funcție de diferența de temperatură (ΔT), între emperatura avută la măsurarea în fabrică și cea din rețea.

Valoarea coeficientului K în funcție de ΔT este redată în tabelul 6.16.

Tabelul 6.16

Coeficientul K, în funcție de diferența de temperatură ΔT

ΔT, °C	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
K	1,2	1,5	1,8	2,3	2,8	3,4	4,1	5,0	6,1	7,3

În exploatare valoarea rezistenței de izolație nu trebuie să fie mai nică de:

— 75% din valoarea măsurată în fabrică la înfășurări de 110 kV și mai puțin;

— 85% din valoarea măsurată în fabrică la înfășurări de 220 kV și mai mult;

— 2 MΩ la înfășurări de 500 V și mai puțin și la temperaturi de 20 ± 10°C.

Coeficientul de absorbție, trebuie să se încadreze în valorile indicate n tabelul 6.17.

Tabelul 6.17

Valori ale coeficientului de absorbție K_{abs}, în funcție de tensiunea nominală U_n și de puterea nominală S_n a transformatoarelor

U_n	S_n	K_{abs}
<110	<10	≥1,3
≥110	≥10	≥1,5

6.6.4. Măsurarea tangentei unghiului de pierderi în dielectrici

Curentul care trece printr-un dielectric este format din cele trei componente ale sale: curentul de deplasare, curentul de absorbție și curentul de conducție. Din aceștia, ultimii doi determină apariția unor pierderi de energie electrică în dielectricul respectiv [6.24].

Aceste pierderi sînt influențate de calitatea dielectricului, precum și de temperatura și umiditatea sa.

Din acest punct de vedere, elementul preponderent care poate fi măsurat și urmărit cu puntea Schering este tangenta unghiului de pierderi dielectrice (tg δ) date de curentul de conducție. Aceasta se explică prin faptul că un dielectric poate fi reprezentat printr-o schemă echivalentă ca în fig. 6.21, în care C este capacitatea dielectricului, R este rezistența echivalentă corespunzătoare pierderilor în dielectric, iar curentul total I prin dielectric este dat de însumarea vectorială a celor doi curenți: I_c care trece prin condensator și I_R care trece prin rezistență;

$$I = I_c + I_R. \tag{6.19}$$

Diagrama vectorială a tangentei unghiului de pierderi dielectrice, corespunzătoare relației (6.19) este redată în fig. 6.22.

În cazul unui dielectric ideal ($R = 0$) unghiul de fazaj între tensiunea U și curentul I va fi 90°. Rezistența echivalentă R condiționează apariția curentului I_R, astfel încît curentul rezultat I va fi defazat față de curentul I_c cu unghiul δ. Cu cît pierderile în dielectric vor fi mai mari, cu atît

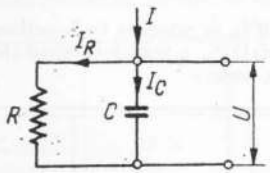


Fig. 6.21. Schema echivalentă a unui dieletric.

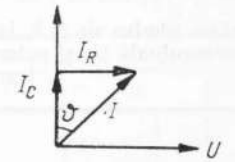


Fig. 6.22. Diagrama vectorială a unghiului de pierderi în dielectric.

ghiul δ, denumit *unghiul de pierderi*, va fi mai mare. În consecință din . 6.22 rezultă :

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_c} = \frac{\frac{U}{R}}{U \cdot C \cdot w} = \frac{1}{R \cdot C \cdot w} = \frac{P}{Q}, \qquad (6.20)$$

de P este puterea reală pierdută în dielectric, iar Q este puterea reac- 'ă în condensatorul format de dielectric.

Astfel tangenta unghiului de pierderi în dielectric va caracteriza în nd calitatea dielectricului respectiv.

În tabelul 6.18 se dau valorile unghiului de pierderi (tg δ) pentru eva materiale dielectrice.

Tabelul 6.18

Valorile unghiului de pierderi (tg δ) ale cîtorva materiale dielectrice

Dielectric	tg δ	Dielectric	tg δ
iclă	$(30-180)10^{-4}$	Hîrtie	$(130-150)10^{-4}$
că	$3 \cdot 10^{-4}$	Parafină	$0{,}8 \cdot 10^{-4}$
ătase	$400 \cdot 10^{-4}$	Ulei de parafină	$3 \cdot 10^{-4}$

Pentru generatoare și compensatoare sincrone, tg δ în exploatare nu ebuie să fie mai mare de 30% din valoarea măsurării obținută la punerea funcțiune.

Pentru transformatoarele și autotransformatoarele de putere, la unerea în funcțiune datele obținute nu trebuie să depășească cu mai mult 30 % datele obținute în fabrică. În lipsa datelor de fabrică, la punerea funcțiune, tg δ, măsurată sau recalculată pentru temperatura de 20°C, u trebuie să depășească valorile din tabelul 6.19.

Tabelul 6.19

lori maxime admise ale tg δ, la temperatura de 20°C, la punerea în funcțiune, funcție tensiunea nominală U_n și puterea aparentă nominală S_n a transformatoarelor și autotransformatoarelor de putere

U_n	kV	⩽ 35	⩽ 35	> 35
S_n	MVA	<2,5	<10	>10
tg δ	%	2,0	1,5	1,0

În exploatare valorile tg δ măsurate sau recalculate pentru temperatura de 20°C, nu trebuie să depășească valorile indicate în tabelul 6.20.

Tabelul 6.20

Valori maxime admise ale tg δ, la temperatura de 20°C, în exploatare, funcție de tensiunea nominală U_n a transformatoarelor și autotransformatoarelor de putere

U_n	kV	< 10	⩽ 35	110 – 220	330 – 500
tg δ	%	—	2,5	2,5	1,3

Pentru izolația principală a transformatoarelor de tensiune pînă la 110 kV, datele obținute atît la punere în funcțiune cît și în exploatare se compară cu datele obținute în fabrică. În lipsa acestora se pot lua orientativ valorile cuprinse în tabelul 6.21.

Tabelul 6.21

Valori orientative ale tg δ, la punere în funcțiune și în exploatare, pentru tg δ măsurată la transformatoarele de tensiune, cu tensiune nominală U_n de pînă la 110 kV, la temperaturi de 10 – 30°C

U_n	kV	10	60
tg δ la punere în funcțiune	%	1,5	2,0
tg δ în exploatare	%	3,0	3,5

Pentru transformatoarele de curent, datele obținute atît la punere în funcțiune cît și în exploatare se compară cu datele de fabrică. În lipsa acestora se iau orientativ valorile indicate în tabelul 6.22.

Tabelul 6.22

Valori orientative ale tg δ la punere în funcțiune și în exploatare, pentru tg δ măsurată la transformatoarele de curent, la temperaturi de 10 – 30°C în funcție de tensiunea nominală U_n

U_n	kV	Pînă la 110 kV		220 – 400 kV	
		10	60	10	U_n
tg δ la punere în funcțiune	%	1,2	1,5	0,7	1,2
tg δ în exploatare	%	3,0	3,5	1,0	1,5

Pentru comparare, deoarece tg δ nu se poate măsura la aceeași temeratură cu măsurătoarea precedentă, valoarea obținută se corectează u un coeficient, în funcție de diferența de temperatură, indicat în tabelul .23.

Tabelul 6.23

Coeficientul K de corecție pentru tg δ, în funcție de diferența de temperatură ΔT

ΔT	°C	10	15	20	25	30	35	40	45	50
K	—	1,3	1,5	1,7	1,9	2,2	2,5	3,0	3,5	4,4

6.6.5. Măsurarea capacității de izolație

Numeroase experiențe efectuate au demonstrat că există o strînsă lependență între capacitatea dielectricului unei izolații și starea lui uscat sau umed, nou sau îmbătrînit). De asemenea, s-a demonstrat și lependența între capacitate și frecvența de încercare.

Din fig. 6.23, *a* rezultă că variația în timp (t) a capacității (C) a unui lielectric este mai lentă la o izolație nouă (*1*), decît la una îmbătrînită *2*). Din fig. 6.23, *b* rezultă că variația în timp (t) a capacității (C) a unui

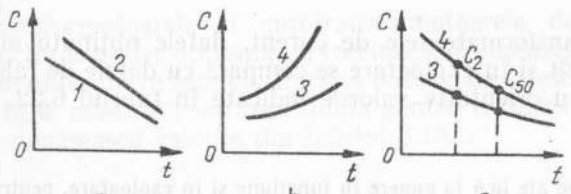


Fig. 6.23. Variația capacității (C) în funcție de timpul (t) de aplicare a tensiunii și de frecvență (f) la o izolație nouă (*1*), la o izolație îmbunătățită (*2*), la o izolație uscată (*3*) și la o izolație umedă (*4*).

lielectric în stare uscată (*3*) este mai redusă decît cea a unei izolații n stare umedă (*4*) și că în valori absolute capacitățile cele mai mari, uate prin comparație, le are izolația umedă. Din fig. 6.23, *c* rezultă că ariația în funcție de frecvența (f) a capacității (C) a unui dielectric este

mai redusă la o izolație uscată (*3*), decît la una umedă (*4*) și că panta de scădere a capacității este mai mare la izolația umedă.

Capacitatea unei izolații este cu atît mai mică, cu cît dielectricul este mai puțin umed și mai puțin murdar.

Măsurările se efectuează la frecvența de 2 per/s și de 50 per/s. Izolația se consideră bună dacă este îndeplinită condiția

$$\frac{C_2}{C_{50}} < 1{,}3. \qquad (6.21)$$

Urmărită în timpul exploatării în mod periodic, prin compararea datelor obținute, se pot trage concluzii privind regresul, mai lent sau mai rapid, al izolației.

6.6.6. Măsurarea nivelului descărcărilor parțiale

În timpul construcției, transportului, montajului și exploatării, în izolația aparatelor electrice se pot forma incluziuni gazoase, în care, sub influența cîmpului electric, se produc descărcări parțiale. Aceasta micșorează durata de viață a izolației respective, incluziunea gazoasă evoluînd în timp, ca urmare a solicitărilor electrice, termice, mecanice și ducînd în final la determinarea izolației.

Metodele de măsurare ale nivelului descărcărilor parțiale sînt foarte diverse și se bazează pe înregistrarea unor mărimi sau fenomene fizice, care însoțesc descărcările parțiale în timpul producerii lor.

Metoda optică constă în sesizarea descărcărilor parțiale, fie pe cale vizuală directă, fie prin fotografiere. Ea se utilizează în special la izolațiile transparente sau translucide și poate sesiza descărcări parțiale cu sarcini mai mari de 1 pC.

Metoda acustică constă în sesizarea pe cale auditivă a descărcărilor parțiale. Se pot sesiza direct, descărcări parțiale cu sarcini mai mari de 40 pC., iar dacă se utilizează și traductoare ultrasonice și mai mici decît acestea.

Metodele chimice au la bază analiza cantităților de gaze care se degaje ca urmare a existenței descărcărilor parțiale în izolație. În general uleiul degaje hidrogen, bioxid de carbon și acetilenă, iar izolația de hîrtie, hidrogen, acetilenă, și compuși ai carbonului cu oxigenul.

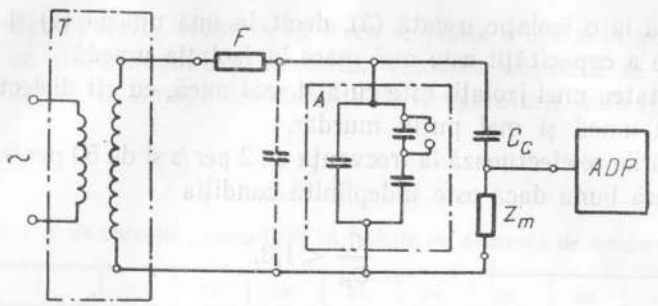


Fig. 6.24. Schema de măsurare a nivelului descărcărilor parțiale.

Metoda gazodinamică constă în măsurarea presiunii gazelor sau aerului in imediata apropiere a locului unde se produc descărcările parțiale. resiunea gazelor descreşte cu cît acțiunea descărcărilor parțiale este ıai mare.

Metoda radiațiilor calorice se bazează pe efectul termic al descărcărilor arțiale. Se sesizează căldura cedată la locul de producere a descărcărilor arțiale și se compară cu căldura degajată de celelalte puncte ale izolației. e ridică periodic asemenea hărți termice, care se compară de asemenea ıtre ele.

Metodele electrice sînt cele mai sensibile și se bazează pe perturbațiile adioactive și pe pierderile de descărcare produse de impulsurile de înaltă ecvență emise de descărcările parțiale. Se măsoară nivelul de descărcări arțiale al unui echipament în ansamblu lui, sau a elementelor lui com-onente. Una din schemele de măsurare utilizate, este redată în fig. 6.24, ıde: T este transformatorul de înaltă tensiune (sursa), A este echipa-entul de încercat, Cc este un condensator de cuplaj, Zm este impedanță e măsură, F este un filtru, iar ADP este aparatul de măsurare a des-ărcărilor parțiale.

Legătura aparatului de măsurare a descărcărilor parțiale se execută ı un cablu coaxial pentru a evita alte influențe exterioare.

În prezent nivelurile descărcărilor parțiale sînt normate, sau sînt opuse pentru normare începînd cu un anumit an.

O sinteză a acestor valori, pentru diferite tipuri de echipamente și ferite țări, este dată de tabelul 6.24.

Tabelul 6.24

Nivelurile maxime ale descărcărilor parțiale, recomandate în diferite țări

Nr. crt.	Echipamentul	Țara	Documentul	Tensiunea, kV		Nivelul max. al desc. part. p C	Observații
				Nominală	De solicitare		
0	1	2	3	4	5	6	7
1	Transformatoare de putere	U.R.S.S.	Îndrumător tehnic al organizației Glavtransformator — 20 iunie 1971	220	U_n	300	
				220	1,5 U_m	3 000	
				500	U_n	300	
				500	1,4 U_m	3 000	
			GOST 20.690/1975	750	1,3 U_m	3 000	în anii 1978—1980
				750	1,3 U_m	300	începînd cu anul 1980
		R.F.G.	CEI 14 (Germany) 38 — mai 1974	—	1,3 U_m	300	la o durată de 30 min
		Anglia	CEI 14 (V. Kingdom) 37 — iunie 1974	—	1,5 U_m	500	la o durată de 30 min
		Polonia	CEI 14 (Polonia) 22 din — iulie 1974	—	1,5 U_m	700	la o durată de 30 min
		Italia	CEI 14 (Italia) 44 din — iunie 1974 .	—	1,2 U_m	200	
2	Bobine de reactanță	U.R.S.S.	GOST 20 650/1975	750	1,3 U_m	750	
3	Transformatoare de tensiune, monofazate, în rețele cu neutrul legat direct la pămînt	—	CEI 38 (Secretariat) 52/1975	—	1,1 U_m	10	izolație lichidă
						50	izolație solidă
		Anglia	CEI 38 (United Kingsdom) 26 din aug. 1976	—	1,2 U_m	10	izolație lichidă, la 0,63 U_m
						100	izolație solidă, la 0,63 U_m

Tabelul 6.24 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7
		Elveția	CEI 38 (Elveția) 28 din aprilie 1976	—	$0{,}8 \cdot 1{,}3\, U_m$	20	izolație lichidă sau solidă, la $1{,}1\, U_m \sqrt{3}$
		Polonia	CEI 38 (Polonia) 9 din august 1971	—	$0{,}8 \cdot 1{,}2\, U_m$	10	izolație lichidă la $1{,}1 \cdot U_m \sqrt{3}$
						50	izolație solidă, la $1{,}1\, U_m \sqrt{3}$
4	Transformatoare de curent	—	CEI 38 (Secretariat) 52 din dec. 1975	—	$0{,}8 \cdot 1{,}3\, U_m$	10	izolație lichidă, la $1{,}1\, U_m \sqrt{3}$
						50	Izolație solidă ; la $1{,}1\, U_m \sqrt{3}$
		Elveția	CEI 38 (Elveția) 28 din aprilie 1976	—	$2\, U_m \sqrt{3}$	10	izolație lichidă ; la $1{,}1\, U_m \sqrt{3}$
						20	izolație solidă ; la $1{,}1\, U_m \sqrt{3}$
		Finlanda	CEI 38 (Filnanda) 26 din mai 1971	—	$1{,}6\, U_m \sqrt{3}$	2	izolație lichidă ; la $1{,}2\, U_m \sqrt{3}$
						10	izolație solidă ; la $1{,}2\, U_m \sqrt{3}$
		Anglia	CEI 38 (Anglia) 26 din august 1974	—	U_m	10	izolație lichidă ; la $0{,}63\, U_m$
						100	izolație solidă ; la $0{,}63\, U_m$
		Suedia	CEI 38 (Suedia) 37 din iulie 1974	—	$1{,}4\, U_m$	100	izolație lichidă ; la $1{,}1\, U_m$
						250	izolație solidă ; la $1{,}1\, U_m$

6.6.7. Încercarea cu tensiune mărită

În timpul exploatării izolația echipamentelor electrice este supusă la [6.25] ;

— tensiunea de lucru pe fază sau între faze, pe o durată nedeterminată ;

— tensiuni ridicate cu $\sqrt{3}$ ori mai mare decît tensiunea pe fază în cazul cînd una din faze are o punere la pămînt, în rețelele cu neutrul nelegat la pămînt, pe toată durata punerii la pămînt ;

— supratensiuni interioare (de comutație), care pot deveni de două sau trei ori mai mari decît tensiunea de lucru ;

— supratensiuni atmosferice, a căror mărime poate depăși de mai multe ori tensiunea de lucru.

În general aparatajul electric se calculează pentru a rezista la primele trei genuri de acțiuni, cea de-a patra fiind protejată prin descărcătoare.

În consecință echipamentele electrice se încearcă profilactic în fabrici, la puneri în funcțiune și periodic în exploatare, la tensiuni mai mari decît tensiunea nominală a echipamentului sau aparatului. Aceste valori se prescriu de fabrica constructoare sau se normează.

Asemenea încercări pot avea loc în curent continuu sau în curent alternativ. Raportul dintre valoarea tensiunii de încercare în curent continuu (V_{cc}) și tensiunea de încercare în curent alternativ (V_{ca}) de frecvență industrială reprezintă *coeficientul de consolidare* (k_c) ;

$$k_c = \frac{V_{cc}}{V_{ca}} . \tag{6.22}$$

Valoarea acestui coeficient de consolidare variază, funcție de tipul materialului electroizolant utilizat, între 1 și 5.

În ceea ce privește durata de încercare, ea depinde de tipul echipamentului și de genul încercării. Astfel, la încercările în curent continuu sînt concludente durate de 10—20 min, mai ales la cabluri, în timp ce la izolația exterioară a separatoarelor sau întreruptoarelor, sînt suficiente 5 min.

6.6.8. Încercarea izolației cu tensiune de impuls

Încercarea izolației cu tensiune de impuls are drept scop verificarea nivelului de ținere a izolației la unde date de supratensiuni [6.26].

Impulsurile se pot realiza cu generatoare de impuls de tipul generatorului Marx, care se bazează pe încărcarea unor condensatoare legate în paralel și pe descărcarea în serie a acestora, valoarea tensiunii de

npuls fiind măsurată cu ajutorul eclatoarelor sferice și a voltmetrelor e impuls [6.22].

Forma tensiunii de impuls s-a normalizat, în urma a numeroase încercări, atît prin CEI [6.27] cît și în cadrul a diferitelor standarde naționale 6.28, 6.29, 6.30 și 6.31]. Cele mai uzitate forme ale tensiunii de impuls înt :

— cu impuls scurt, care echivalează cu unda unei supratensiuni tmosferice ;

— cu impuls lung, care echivalează cu unda unei supratensiuni de omutație.

În toate cazurile, curba de reper pentru diferite tipuri de aparate și chipamente electrice este caracteristica de impuls a izolației (fig. 6.25). Aceasta se obține prin încercări de impuls efectuate asupra mai multor parate electrice de același tip, pînă la străpungerea izolațiilor, aplicînd pe durate diferite (t), tensiuni de impuls (U). Din curba ce rezultă rin puncte, se observă că tensiunea de străpungere este cu atît mai mică u cît durata de aplicare este mai mare.

Tensiunea de impuls scurt se caracterizează prin valori mici ale timpului de aplicare (de ordinul microsecundelor). Aceasta s-a normalizat i funcție de forma undei de impuls și poate fi : tensiune de impuls cu undă plină sau tensiune de impuls cu undă tăiată.

În cazul *tensiunii de impuls cu undă plină*, valorile convenite ale duratelor frontului și semiaplitudinii, pentru R.S.R. sînt : 1,2 μs pînă în momentul apariției amplitudinii maxime a tensiunii (U_m) și 50 μs pînă în momentul în care tensiunea scade pe spatele undei pînă la jumătate din valoarea de vîrf (0,5 U_m) (fig. 6.26).

În cazul *tensiunii de impuls cu undă tăiată*, aceasta poate fi de două feluri, în raport cu momentul apariției tăierii undei : tăiere pe frontul undei (fig. 6.27, *a*) și tăiere pe coada undei (fig. 6.27, *b*).

Tensiunea de impuls lung se caracterizează prin valori mari convenite ale duratelor pînă în momentul apariției amplitudinii maxime a tensiunii (U_m) de 250 μs și de 2 500 μs pînă în momentul atingerii a 50% din amplitudinea maximă (fig. 6.28).

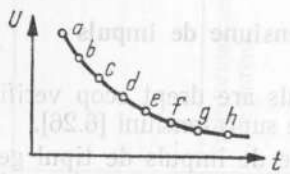


Fig. 6.25. Caracteristica de impuls a izolației.

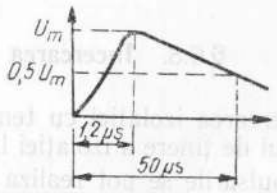


Fig. 6.26. Tensiunea de impuls scurt cu undă plină.

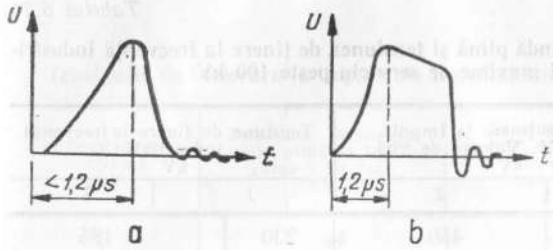


Fig. 6.27. Tensiunea de impuls scurt cu undă tăiată : *a* — pe frontul undei ; *b* — pe coada undei.

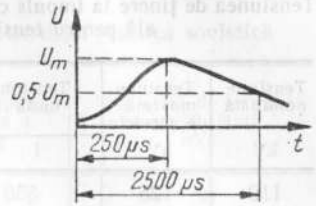


Fig. 6.28. Tensiunea de impuls cu undă lungă.

În funcție de nivelele de ținere ale izolației echipamentelor la impuls scurt, se aleg nivelele de protecție ale descărcătoarelor pentru protejarea echipamentelor contra supratensiunilor atmosferice pentru toată gama de tensiuni nominale.

La echipamentele cu tensiuni nominale mai mari de 300 kV se fixează și niveluri de ținere ale izolației echipamentelor la impuls lung (impuls de comutație) și în funcție de acestea se aleg nivelele de protecție ale descărcătoarelor cu rezistență variabilă cu suflaj magnetic pentru protejarea echipamentelor contra supratensiunilor de comutație.

Pentru exemplificare se redau în continuare valorile acceptate ale tensiunii de ținere la impuls în cîteva țări.

În R.S.R. prin standard sînt acceptate valorile indicate în tabelele 6.25 și 6.26 [6.28]. Valorile din coloana 1 se utilizează pentru transformatoare de putere iar cele din coloana 2 pentru izolatoare și aparate electrice.

Tabelul 6.25

Tensiunea de ținere la impuls cu undă plină și tensiunea de ținere la frecvență industrială pentru tensiuni maxime de serviciu sub 100 kV

Tensiune nominală	Tensiune max. de serviciu	Tensiune de ținere la impuls undă 1,2/50. Valoare de vîrf,	Tensiune de ținere la frecvență industrială kV	
kV	kV	kV	1	2
6	7,2	60	22	27
10	12	75	28	35
20	24	125	50	55

Tabelul 6.26

ensiunea de ţinere la impuls cu undă plină şi tensiunea de ţinere la frecvenţă industrială pentru tensiuni maxime de serviciu peste 100 kV

Tensiune nominală	Tensiune maximă de serviciu	Tensiune de ţinere la impuls, undă 1,2/50. Valoare de vîrf, kV		Tensiune de ţinere la frecvenţă industrială, kV	
kV	kV	1	2	1	2
110	125	550	450	230	185
220	245	1 050	900...750	460	395...325
400	420	—	1 675...1 300	—	740...570

Valori ale tensiunii de ţinere la impuls cu undă plină sînt indicate n tabelul 6.27 după CEI [6.27]. Coloana 1 se referă la reţelele neexpuse în care nivelul supratensiunilor atmosferice şi interne este mic) ca de ex. reţelele urbane extinse în cablu subteran. Coloana 2 se referă la reţe-ele în care nivelul supratensiunilor atmosferice şi interne este mare, ca de ex. reţelele aeriene.

Tabelul 6.27

Tensiunea de ţinere la impuls cu undă plină şi tensiunea la frecvenţă industrială, bazate pe practica curentă din cea mai mare parte a ţărilor europene şi cîteva alte ţări, pentru tensiuni maxime de serviciu mai mici ca 52 kV

Tensiune maximă de serviciu kV	Tensiune de ţinere la impuls undă 1,2/50. Valoare de vîrf, kV		Tensiune de ţinere de scurtă durată la frecvenţa industrială kV
	1	2	
3,6	20	40	10
7,2	40	60	20
12	60	75	28
24	95	125	50

Unele fabrici de transformatoare, pe baza practicii proprii îşi stabilesc undele normate de tensiune de impuls. Aşa este cazul fabricii MTZ — U.R.S.S. unde valorile de ţinere la impuls cu undă plină şi cu undă tăiată s-au ales după datele indicate în tabelul 6.28 [6.32].

Pentru tensiunea de ţinere la impuls cu undă de front CEI recomandă valori cu 15% mai mari decît pentru tensiunea de ţinere la un impuls cu undă plină.

Tabelul 6.28

Tensiunile de încercare la impuls ale transformatoarelor după practica sovietică

Tensiunea nominală kV	Tensiunea de impuls undă plină la încercarea unei faze kV	Tensiunea de impuls, undă plină la încercarea a trei faze kV	Tensiunea de impuls cu undă tăiată kV
3	44	42	50
6	60	57	70
10	85	80	100
15	108	100	120
35	195	140	215
110	480	—	530
150	660	—	730
220	945	—	1 050
400	1 700	—	1 800

BIBLIOGRAFIE

6.1. Hantefeuille, P. ş.a. *Field experiments on mechanical behaviour of overhead lines.* Rap CIGRÉ-236-1964.

6.2. Johnson, R. R. *Estimation of iceloards in overhead lines* — Rap. CIGRÉ 22-07-1976.

6.3. Bercovici, M. şi Arie, A. *Reţele electrice. Calculul mecanic.* Editura tehnică, 1963.

6.4. Verebely, L. *Villamos Eröatvitel* vol. 3. Müszabi Kiadó, Budapest, 1958.

6.5. Winants, W. ş.a. *Le galop des conducteurs des lignes éléctriques.* Rap. 22-06 CIGRÉ 1970.

6.6. Liberman, A. I. *Les oscillation en portée partielles et le galop des conducteurs sur les lignes à haute tension.* Rap. 22-09 CIGRÉ 1974.

6.7. Pogarski, V. I. *Exploatarea cablurilor de curenţi tari şi înaltă tensiune* (traducere din limba rusă). Editura tehnică, Bucureşti, 1951.

6.8. M.E.E. — *Normativ pentru construcţia liniilor aeriene de energie electrică peste 1 000 V* — PE 104/1971 — ODE — Bucureşti.

6.9. M.E.E. — *Normativ pentru construcţia liniilor electrice aeriene cu tensiuni pînă la 380 V inclusiv* (partea mecanică) — PE 106/1971 — ODE Bucureşti.

6.10. Dupin, P. şi Teissie, M. Solier *Les turbillons alternés de B. Karman.* R.G.E. — 1928.

6.11. Roulleau, M. *Mecaniome de la congellation de l'eau.* În J.S. de Météorologie, 1957.

6.12. Drăghicescu, C. *Probleme ale poluării izolaţiei instalaţiilor energetice*—M.E.E.—ODE—1971.

7. METODE MODERNE DE LOCALIZARE ŞI DE REMEDIERE A DEFECTELOR DIN INSTALAŢIILE ELECTRICE

7.1. METODE DE LOCALIZARE ŞI DE REMEDIERE A DEFECTELOR ÎN LINIILE ELECTRICE AERIENE

7.1.1. Localizarea şi remedierea preventivă a defectelor în liniile electrice aeriene

Într-un număr important de cazuri este posibilă detectarea unor defecţiuni încă înainte ca ele să fi evoluat pînă la faza de a provoca scoaterea din funcţiune a liniei. Astfel sînt deteriorări ale instalaţiilor de legare la pămînt, coroziunea stîlpilor metalici, putrezirea stîlpilor de lemn, coroziunea conductelor, modificări ale săgeţii conductelor sau deplasarea lor din clemele de întindere şi deteriorări mai puţin pronunţate ale izolatoarelor.

Localizarea preventivă a defectelor se face periodic, cu ocazia supravegherii (care nu necesită scoaterea de sub tensiune a liniilor), sau a reviziei (cu scoaterea de sub tensiune a liniei).

Supravegherea permite detectarea directă vizuală a următoarelor defecte : deteriorarea legăturilor la prizele de pămînt (deteriorări mecanice, coroziuni), corodarea elementelor metalice, în special în zonele picioarelor stîlpilor, apariţia crăpăturilor în stîlpii de beton şi putrezirii stîlpilor de lemn. Se menţionează că pentru a constata gradul de putrezire a stîlpilor este necesară verificarea cu ajutorul unui burghiu (fig. 7.1), deoarece în majoritate, stîlpii din lemn sînt din brad impregnat şi în acest caz putrezirea are loc în interiorul stîlpului. Numai la stîlpii din stejar, care nu se impregnează, putrezirea apare întîi în stratul exterior.

Pentru partea de coronament, supravegherea trebuie făcută cu ajutorul binoclului şi în anumite cazuri cu ajutorul teodolitului. Supravegherea cu binoclul poate scoate în evidenţă unele defecţiuni, ca de exemplu, unele deteriorări superficiale ale izolatoarelor, deplasări ale unor legături, începuturi de coroziune la conductoare. Verificarea cu teodolitul permite

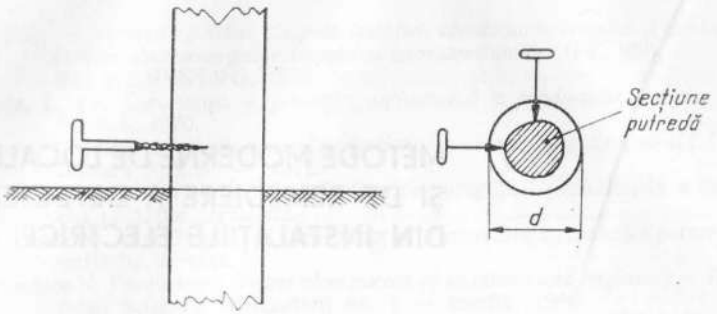


Fig. 7.1. Verificarea gradului de putrezire a stîlpilor de lemn.

eterminarea stării săgeților conductoarelor și a distanțelor principale intre elementele aflate sub tensiune și stîlp.

Desigur, supravegherea făcîndu-se de la distanță, numeroase defecuni de la nivelul coronamentului vor trece neobservate; ele necesită ontrolul periodic cu urcare pe fiecare stîlp. Urcarea pe fiecare stîlp e face cu ocazia reviziei, cu scoaterea de sub tensiune a liniei. Cu această cazie trebuie dată atenție deosebită acelor elemente care nu sînt altfel ccesibile: izolatoarele și piesele lor de legătură, armăturile de protecție, emele de susținere și de întindere ale conductoarelor, starea consolelor a vîrfarelor.

Verificarea stării elementelor lanțurilor de izolatoare este posibilă, ub tensiune, cu ajutorul dispozitivului de măsurare a repartiției tensinii (fig. 7.2).

În cazul cînd toate izolatoarele sînt în stare bună, tensiunea se reparzează pe elementele lanțului în funcție de capacitățile lor proprii și elative față de pămînt (fig. 7.3, *a*). În cazul unui izolator defect, aceasta e manifestă prin diferență de potențial zero (fig. 7.3, *b*).

Verificarea stării clemelor de legătură electrică se poate face cu ajutorul nor dispozitive de măsurare a căderii de tensiune (fig. 7.4).

Comparînd căderea de tensiune pe o porțiune de linie de egală lungime, ar fără clemă, se poate observa dacă a apărut un contact defectuos. Desigur, pentru a avea sensibilitate maximă este de dorit ca măsurarea ă aibe loc într-o perioadă de sarcină maximă.

Atît verificarea stării lanțului de izolatoare, cît și verificarea stării emelor de curent, se face cu dispozitive montate pe stîngi izolante, arte lungi. Ele pot fi manevrate de pe stîlpi sau de pe platforme auto-

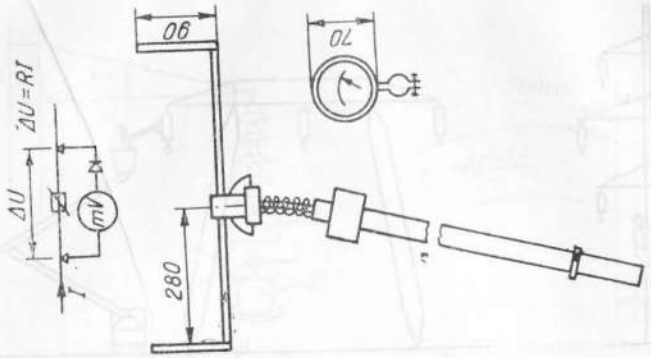


Fig. 7.4. Măsurarea căderii de tensiune pe clema unei linii electrice aeriene.

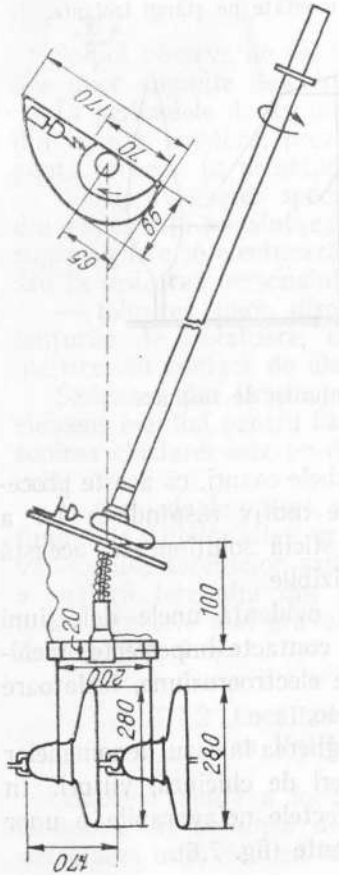


Fig. 7.2. Verificarea stării elementelor lanțurilor de izolatoare cu ajutorul aparatului de măsurare a repartiției tensiunii.

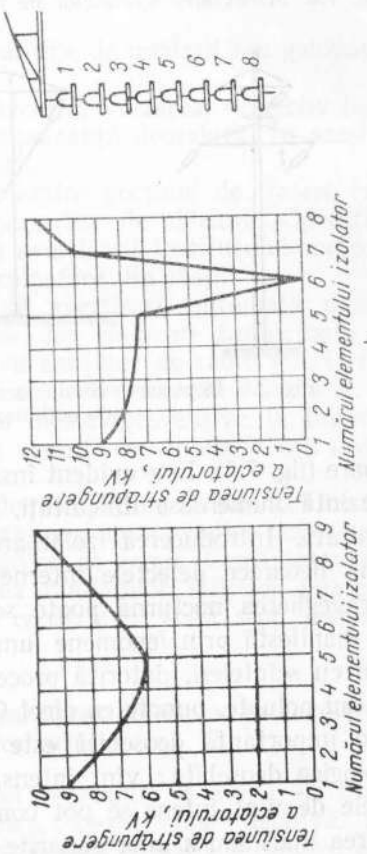


Fig. 7.3. Repartiția tensiunii pe un lanț de izolatoare din șase elemente: *a* — situația normală; *b* — izolatorul 3 avariat.

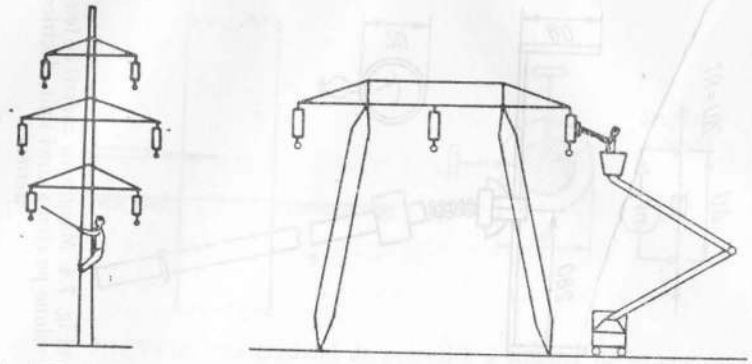


Fig. 7.5. Manevrarea aparatelor de măsurare montate pe ştângi izolante.

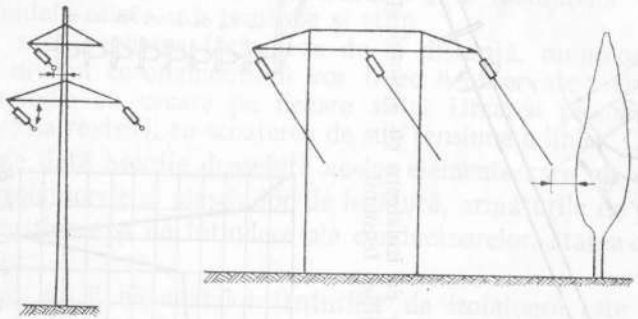


Fig. 7.6. Deplasarea conductoarelor şi lanţurilor de susţinere sub acţiunea vîntului.

dicătoare (fig. 7.5). Este evident însă, în ambele cazuri, că aceste proce-ee prezintă numeroase dificultăţi, din care motiv răspîndirea lor a ost limitată. Introducerea izolatoarelor de sticlă soluţionează această roblemă deoarece defectele interne sînt vizibile.

Supravegherea nocturnă poate scoate în evidenţă unele defecţiuni are se manifestă prin fenomene luminoase: contacte imperfecte, încăl-te, sau cu scînteieri, datorită procesului de electroeroziune, izolatoare efecte sau poluate, puncte cu efect Corona etc.

De o importanţă deosebită este supravegherea în cazul fenomenelor eteorologice deosebite: vînt intens, depuneri de chiciură, viituri. În erioadele de vînt intens se pot constata efectele nefavorabile a unor geţi prea mari sau a unor gabarite insuficiente (fig. 7.6).

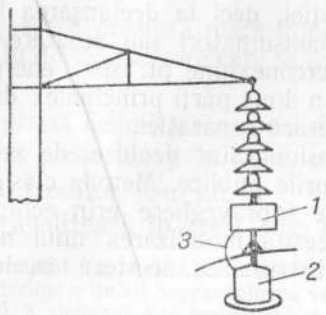


Fig. 7.7. Avertizor de chiciură.

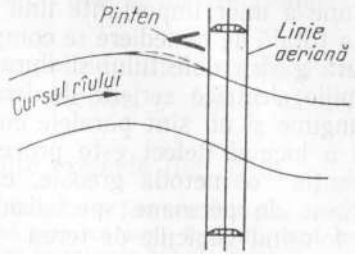


Fig. 7.8. Devierea unei viituri în preajma unui stîlp.

Se pot observa de asemenea apariţiile de oscilaţii sau galopări, specifice unor anumite deschideri.

În perioadele de depuneri de chiciură, sesizarea, respectiv localizarea din timp a acestora, prezintă o importanţă deosebită. În acest sens se poate proceda în următoarele feluri:

— supravegherea specială a anumitor porţiuni de traseu, cunoscute din experienţă că sînt expuse depunerilor de chiciură. Operaţiunea de supraveghere se efectuează în baza avertizării Institutului meteorologic; sau la sesizarea personalului de exploatare din staţii.

— folosirea unor dispozitive de avertizare automată montate în lanţurile de izolatoare, constituite din elemente traductoare dinamometrice, cu contact de alarmă şi cu emiţător de radio (UUS) (fig. 7.7).

Sesizarea din timp a apariţiei, respectiv formării chiciurei, este un element esenţial pentru luarea unor măsuri preventive, la liniile pe care topirea chiciurei este posibilă prin curenţi de circulaţie sau de scurtcircuit.

În perioade de viituri, supravegherile speciale trebuie să aibe în vedere fundaţiile stîlpilor aflaţi în zonele expuse şi anume: albia majoră a rîurilor, văi expuse torentelor sau alunecărilor de teren. Constatarea din timp a spălării terenului din apropierea fundaţiilor stîlpilor poate preveni avarii din cele mai grave. Se pot construi în acest scop dispozitive de deviere (fig. 7.8).

7.1.2. Localizarea şi remedierea defectelor în cazuri de avarii în liniile electrice aeriene

Găsirea rapidă a locului defect reprezintă o etapă de importanţă deosebită în acţiunea de remediere, uneori chiar decisivă. Deobicei, defectarea unui element al liniei (stîlp rupt, izolator străpuns, conductor

ut etc.) conduce la deteriorarea izolației, deci la declanșarea liniei, pectiv întreruperea alimentării unor consumatori sau scoaterea din ucțiune a unor importante linii de interconexiune pt. sist. energetic. rata totală de remediere se compune din două părți principale: durata esară găsirii defectului și durata necesară reparației.

Liniile electrice aeriene de înaltă tensiune sînt deobicei de zeci de lungime și nu sînt paralele cu drumurile publice. Metoda clasică de sire a locului defect este procedeul de supraveghere prin echipe de ervență: o metodă greoaie, care necesită mobilizarea unui număr portant de persoane specializate și distribuirea acestora în lungul iei, folosind vehicule de teren.

Exemplul 7.1. Din exemplul arătat în fig. 7.9, se poate vedea că o astfel de ope-ie, chiar dacă e pregătită perfect, în conformitate cu instrucțiunile de serviciu, ră-te timp îndelungat, ore prețioase în primul rînd pentru consumatorii, industriali pentru unele servicii publice de importanță vitală (spitale, telecomunicații etc.). Astfel, admițînd că atît în stația *1*, cît și în stația *2* (fig. 7.9) există cîte două echipe intervenție și cîte un autoturism de teren, pregătite pentru plecare, supravegherea decurge în felul următor (considerînd că mașinile circulă cu viteza de cca. 60 km/h):

— echipa nr. 1 din stația *1* pleacă în lungul liniei, spre stația *2* (începe supraveerea la ora *H*);

— echipa nr. 2 din stația *1* pleacă cu mașina pînă la intersecția liniei cu drumul acces nr. 1 (începe supravegherea la ora $H + 0{,}5$ ore și se îndreaptă spre stația *1*);

— echipa nr. 3 din stația *2* pleacă în lungul liniei, spre stația *1* (începe supraveerea la ora *H*);

— echipa nr. 4 din stația *2* pleacă cu mașina pînă la intersecția liniei cu drumul acces nr. 2 (începe supravegherea la ora $H + 0{,}3$ ore și pleacă spre stația *1*).

Supravegherea se încheie astfel (considerînd că echipele pot parcurge cca. 3 km/h lungul liniei):

— echipa nr. 1 se întîlnește cu echipa nr. 2, în jurul orei $H + 4{,}5$ ore;

— echipa nr. 3 ajunge la intersecția cu drumul 2 la $H + 5$ ore;

— echipa nr. 4 ajunge la intersecția cu drumul 1 la $H + 6{,}5$ ore.

În ipoteza că echipele sînt dotate cu radiotelefoane, acoperind o distanță sufici-tă pentru a putea comunica cu stațiile, respectiv cu autoturismele rămase la inter-cțiile liniei cu cele două drumuri (distanța maximă 14 km), rapoartele de supraveere se pot obține după max. 4,5, respectiv 6 ore de la pornire.

Se observă deci că admițînd o bună organizare și dotare, duratele fectate supravegherii sînt de același ordin de mărire cu duratele necesare nor remedieri (cu excepția cazurilor în care s-au răsturnat stîlpi).

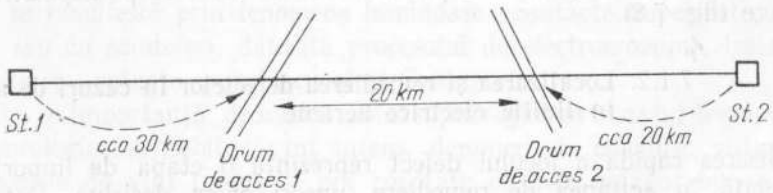


Fig. 7.9. Parcurgerea traseului unei linii în caz de defect.

De aceea prezintă mare importanță utilizarea unor metode de măsurare sau de semnalizare care să delimiteze cît mai strîns zona afectată de defect.

O primă delimitare a zonei defecte se obține din indicațiile de funcționare a protecției prin relee, care arată deobicei și faptul că defectul a fost trecător sau nu.

Se analizează în acest sens mai multe exemple (fig. 7.10).

Exemplul 7.2. Astfel, în cazul fig. 7.10, *a*, defectul a fost trecător și a avut loc în ultima treime a liniei. Supravegherea va trebui să găsească urme de conturnare. În cazul fig. 7.10, *b*, defectul este permanent și a avut loc în primele 2/3 ale liniei. Supravegherea va trebui să găsească un defect definitiv (conductoare căzute, lanțuri rupte) în această porțiune.

Se poate observa că aceste indicații sînt încă prea incerte pentru a putea contribui la o reducere substanțială a duratei remedierii. În acest

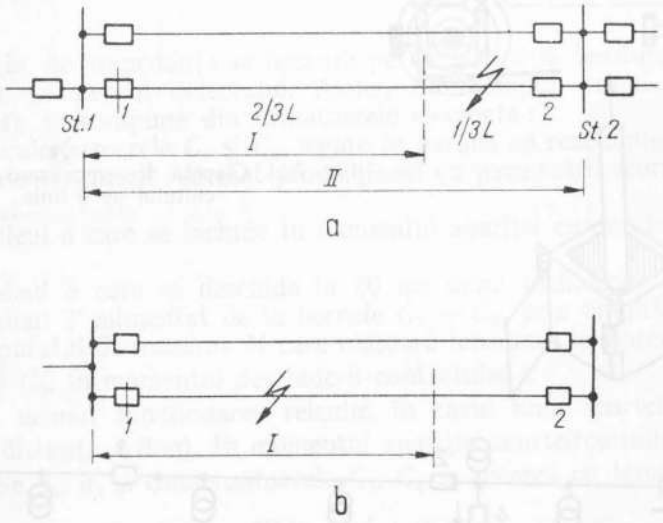


Fig. 7.10. Acționarea protecției în diferite cazuri de defect pe linie.

scop se utilizează în prezent relee maximale cu memorizare, relee de impedanță și locatoare de defect, bazate pe principiul reflexiei impulsului.

Releele de suprasarcină cu memorizare sînt folosite în două cazuri: la rețele cu multe ramificații, pentru delimitarea ramificației cu defect și la linii de 110—400 kV cu stîlpi metalici, pentru detectarea stîlpului cu izolatorul defect.

În fig. 7.11 se arată construcția de principiu a unui astfel de releu losit la linii aeriene de medie tensiune. Circuitul său magnetic îmbracă nductorul liniei, iar clapeta de semnalizare este astfel așezată ca să e posibilă observarea ușoară de la distanță și repunerea ei în starea ini-ală, după o eventuală funcționare. Delimitarea zonei cu defect se face in supravegherea punctelor dotate cu astfel de relee; în cazul din g. 7.12, funcționarea releelor *1*, *4* și *5* indică zona defectă.

În fig. 7.13 se arată construcția unui releu pentru determinarea stîl-ului cu izolator defect. Acest dispozitiv este foarte important în cazuri e conturnări care nu lasă urme ușor vizibile. Pentru a preveni indicații lse datorate menținerii îndelungate, memorizarea este cu durată limitată chiar dacă defectul nu a fost depistat, releul revine în poziția de pregă-re pentru o nouă înregistrare.

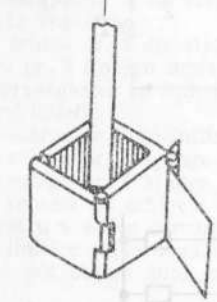


Fig. 7.11. Clapetă de semnalizare a scurtcir-cuitului pe o linie.

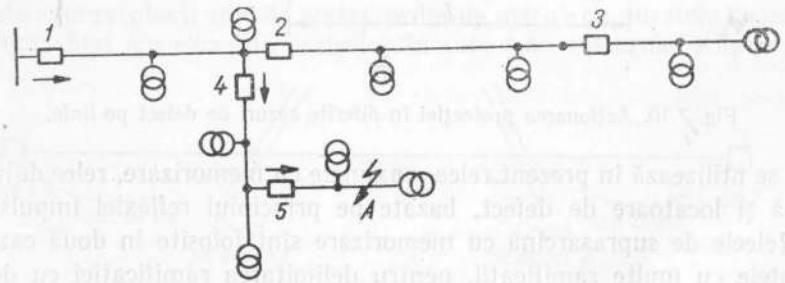


Fig. 7.12. Semnalizarea scurtcircuitului pe o linie arborescentă.

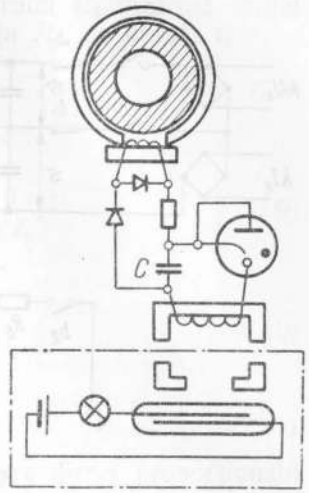


Fig. 7.13. Releu pentru determinarea stîlpului cu izolator defect.

Releele de impedanță se bazează pe memorizarea tensiunii și curen-tului din momentul defectului. Astfel, de exemplu, releul SIEMENS (fig. 7.14), se compune din următoarele elemente:

— condensatoarele C_1 și C_2, legate în paralel cu rezistențele R_1 și R_2, alimentate cu curent redresat proporțional cu parametrii scurtcircuitului (I_k și u_k);

— releul a care se închide în momentul apariției curentului de scurt-circuit;

— releul b care se deschide la 30 ms după închiderea releului a;

— releul T alimentat de la bornele $C_1 + C_2$, prin amplificatorul L;

— aparatul de măsurat M care măsoară tensiunea la bornele conden-satorului C_3, în momentul deschiderii contactului t.

Vom urmări funcționarea releului în cazul unui scurtcircuit între faze, la distanța x (km). În momentul apariției scurtcircuitului se închid contactele a_1, a_2 și condensatoarele C_1, C_2 se încarcă cu tensiunile:

$$(C_1)u_1 = k_1 I_u; \tag{7.1}$$

$$(C_2)u_2 = k_2 U_u. \tag{7.2}$$

După 30 ms, se deschid contactele b_1, b_2 și condensatoarele se descarcă pe circuitul R_1, R_2, astfel:

$$u = k_2 U_u e^{-\frac{t}{T_u}} - k_1 I_k e^{-\frac{t}{T_i}}, \tag{7.3}$$

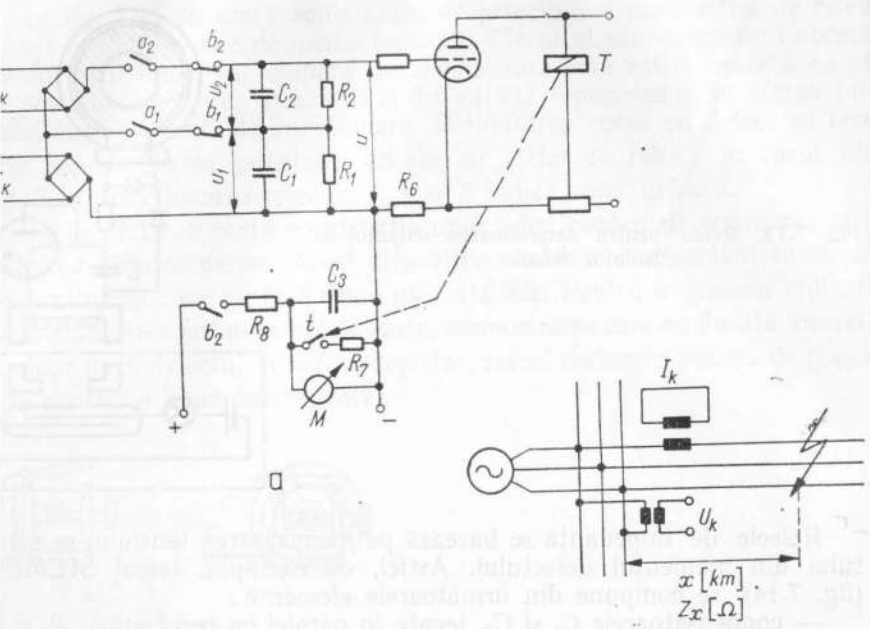


Fig. 7.14. Releu de impedanță pentru localizarea defectului.

nde:

$T_u = C_2R_2$;

$T_i = C_1R_1$.

La un moment t_0, $u = 0$ adică,

$$k_2U_k e^{-\frac{t_0}{T_u}} = k_1I_k e^{-\frac{t_0}{T_i}}, \tag{7.4}$$

e unde rezultă $t_0 = \frac{T_uT_i}{T_u - T_i} \ln \frac{k_1I_k}{k_2U_k}$. (7.5)

Se observă că raportul $\frac{U_k}{I_k} = 2Z_x$ (7.6)

eci $t_0 = \frac{T_uT_i}{T_u - T_i} \ln \frac{k_1}{k_2(2Z_x)} = \frac{T_uT_i}{T_u - T_i} \ln \frac{1}{CZ_x}$ (7.7)

Dacă s-ar măsura t_0, rezultatul ar fi dat logaritmic, deci mai dificil e interpretat. În consecință, pentru indicație se folosește aparatul M,

care măsoară tensiunea la bornele condensatorului C_3 încărcat inițial cu tensiunea U_a și care se descarcă pe rezistența R_7, pe durata t_0:

$$u_a = U_a e^{-\frac{t_0}{T_a}}, \tag{7.8}$$

unde

$$t_0 = T_a \ln \frac{U_a}{u_a} = \frac{T_uT_i}{T_u - T_i} \ln \frac{1}{CZ_0}. \tag{7.9}$$

Dacă se alege

$$T_a = \frac{T_uT_i}{T_u - T_i}, \tag{7.10}$$

rezultă

$$u_a = U_a cZ_x, \tag{7.11}$$

deci aparatul de măsurat M va indica o valoare direct proporțională cu Z_x. În acest scop, releul T — alimentat cu o tensiune proporțională cu u — va deschide contactul t în momentul cînd $u = 0$, deci condensatorul C_3 se va descărca pe rezistența R_7 pe durata t_0.

Determinarea distanței pînă la locul de defect, cu ajutorul releului de impedanță, este afectată de două genuri de erori:

— eroarea datorită sensibilității limitate, (de ord. 5%);

— eroarea datorită faptului că în valoarea impedanței intră și rezistența arcului.

Pentru a reduce influența acestor erori, în cazul în care linia este alimentată de la două capete, se pot folosi indicațiile unor relee de impedanță montate la cele două capete (fig. 7.15).

O schemă mai perfecționată, care elimină erorile datorite rezistenței arcului și a punerii la pământ, se bazează pe măsurarea unor componente

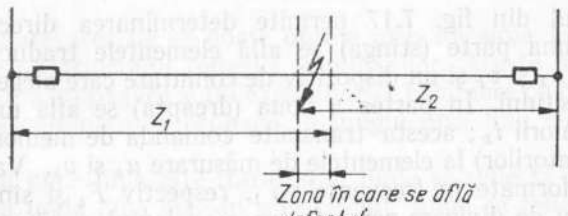


Fig. 7.15. Detectarea defectului pe o linie alimentată de la două capete.

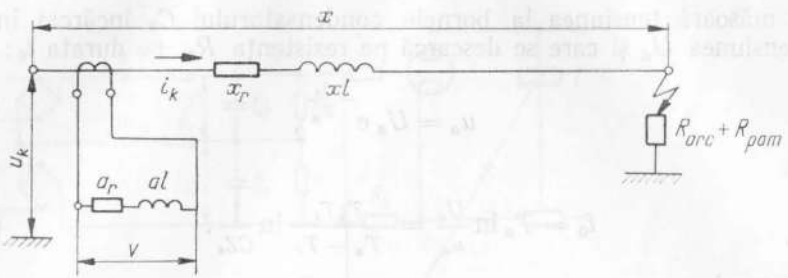


Fig. 7.16. Schema de principiu pentru detectarea locului defect, cu eliminarea influenței rezistenței.

influențate de rezistențele din circuit (fig. 7.16). Se măsoară valorile stantanee ale tensiunii u_k între fază și pămînt (la sursă) și ale unei nsiuni v, la bornele unei impedanțe-model, alimentate cu un curent oporțional cu curentul de scurtcircuit (i_k). Impedanța-model are rezisnța și inductivitatea proporționale cu rezistența r, respectiv inductitatea l pe unitate de lungime a liniei. Defectul fiind la distanța x, prin zistența de arc și de trecere la pămînt R, vom avea relațiile

$$u_k = (x_r + R)i_k + xl\frac{di_k}{dt} \text{ (pe linie)}; \tag{7.12}$$

$$v_k = ari_k + al\frac{di_k}{dt} \text{ (pe circuitul model)}. \tag{7.13}$$

În momentul cînd $i_k = 0$:

$$u_{k0} = xl\frac{di_k}{dt}, \tag{7.14}$$

$$i_{k0} = al\frac{di_k}{dt}, \tag{7.15}$$

zultă

$$x = a\frac{u_{k0}}{v_{k0}}. \tag{7.16}$$

Dispozitivul din fig. 7.17 permite determinarea directă a acestei alori. În prima parte (stînga) se află elementele traductoare pentru măsurarea i_k, u_k și v_k și un dispozitiv de comutare care alege fazele coresunzător defectului. În partea a doua (dreapta) se află un element de măsurare a valorii i_k; acesta transmite comanda de memorizare (conecrea condensatorilor) la elementele de măsurare u_k și v_k. Valorile $u_{k(0)}$ și $_0$ sînt transformate în frecvențele F_1, respectiv F_2 și sînt transferate nui dispozitiv de divizare care efectuează calculul și afișează rezultatul

$$x = a\frac{u_{k0}}{v_{k0}}.$$

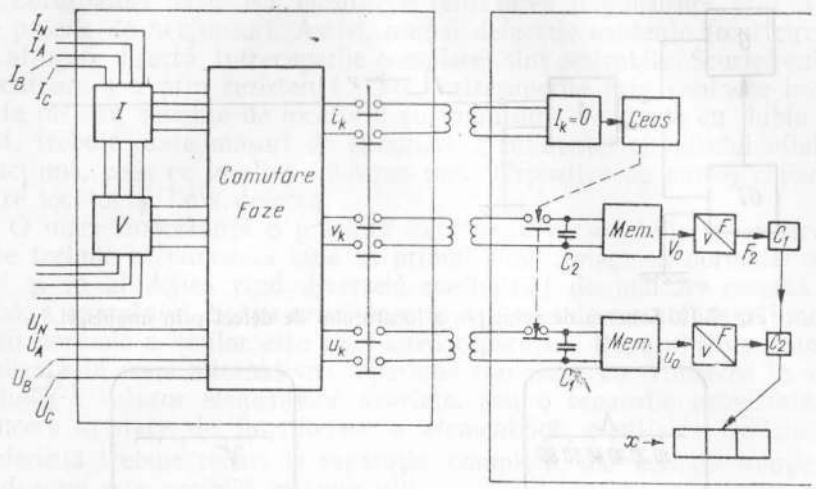
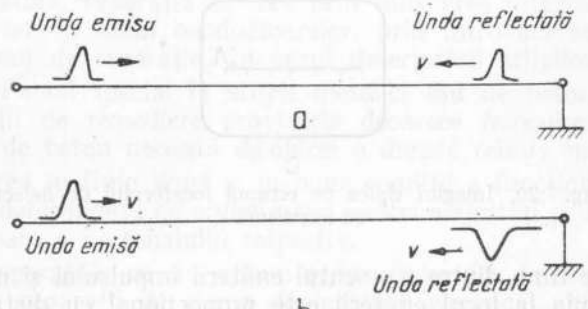


Fig. 7.17. Schema locatorului de defect cu eliminarea influenței rezistenței arcului.



b

Fig. 7.18. Principiul detectării defectului pe baza reflectării impulsului.

Cea mai mare precizie se poate obține prin folosirea locatoarelor de defect bazate pe principiul reflexiei impulsurilor. Aceste locatoare folosesc proprietățile propagării și reflexiei undelor călătoare pe linii și anume:

— o undă călătoare se propagă în lungul unei linii cu viteză constantă;

— în locul unde linia este întreruptă, unda se reflectă;

— în locul unde linia este în scurtcircuit, unda se reflectă cu sensul schimbat (fig. 7.18).

În consecință, dacă pe o linie defectă se emit impulsuri de tensiune, ele se vor propaga pînă la locul defectului, de unde se vor reflecta.

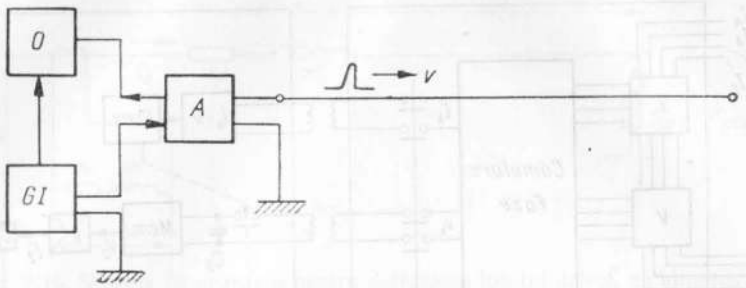


Fig. 7.19. Schema de principiu a locatorului de defect prin impulsuri.

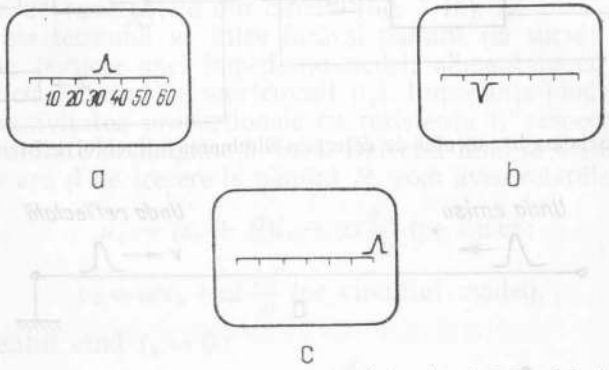


Fig. 7.20. Imagini tipice pe ecranul locatorului de defecte cu impulsuri.

ntervalul de timp dintre momentul emiterii impulsului și momentul re-enirii acestuia la locul emiterii este proporțional cu distanța pînă la ocul defectului și permite determinare acestei distanțe astfel:

$$x = \frac{1}{2} vt \qquad (7.17)$$

nde $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$; L este inductivitatea liniei; C — capacitatea liniei.

În fig. 7.19 este prezentat un locator de defect care folosește aceste rincipii.

Elementele principale sînt: generatorul de impulsuri (*G.I.*), dispozi-ivul diferențial și de adaptare la linie (*A*) și osciloscopul (*O*) care vizu-lizează pe ecran decalajul dintre impulsul emis și cel reflectat.

Imaginea obținută pe ecranul osciloscopului (*O*) este arătată pentru iferite situații în fig. 7.20.

Locatoarele de defect bazate pe reflectarea impulsurilor prezintă și ele o serie de neajunsuri. Astfel, numai defectele evidente (scurtcircuite cu atingere directă, întreruperile complete) sînt sesizabile. Scurtcircuitele trecătoare sau prin rezistență mare, întreruperile prin contacte imperfecte nu sînt sesizate de locatorul cu impulsuri. Pe liniile cu dublu circuit, trebuie luate măsuri de eliminare a influenței circuitului aflat în funcțiune, ceea ce implică folosirea unui dispozitiv de cuplaj capacitiv între locator și linia defectă.

O mare importanță o prezintă experiența personalului de deservire, care trebuie să cunoască bine în primul rînd „imaginea normală" a liniei și în al doilea rînd diversele posibilități de indicare corectă sau falsă, a aparatului. Etapa următoare în acțiunea de restabilire a funcționării normale a liniilor este efectuarea reparației. Reparația va putea fi realizată în două alternative: repararea completă, cu reducerea în stare inițială a tuturor elementelor avariate, sau o reparație provizorie, cu aducere în stare de funcționare a elementelor esențiale. Desigur, de preferință trebuie recurs la reparația completă, dar această soluție nu totdeauna este posibilă în timp util.

Astfel, în cazul deteriorării izolatoarelor, clemelor, sau a diverselor piese de legătură, reparația se face prin înlocuirea integrală a pieselor deteriorate, iar în cazul conductoarelor, prin introducerea unor mufe de înădire sau de reparație. În cazul deteriorării stîlpilor sau fundațiilor — și în mod special la stîlpii metalici sau de beton — se aplică deseori soluții de remediere provizorie deoarece înlocuirea unui stîlp metalic sau de beton necesită de obicei o durată relativ mare.

Restabilirea în timp scurt și în bune condiții a funcționării unei linii aeriene este determinată de organizarea acestei activități și de pregătirea corespunzătoare a personalului respectiv.

Pentru reparațiile cu un volum redus (înlocuiri de izolator-suport, înlocuiri sau reparații de cleme de legătură electrică), echipele de intervenție sînt dotate cu un mic stoc de piese și de sculele strict necesare. Avînd în vedere însă, pe de o parte componența restrînsă a acestor echipe (2—3 persoane, inclusiv șoferul) și faptul că aceste echipe nu pot fi imobilizate timp mai îndelungat, fiind necesară disponibilitatea lor pentru alte intervenții, pentru majoritatea reparațiilor se organizează echipe speciale, formate din personalul de reparație care se mobilizează în acest scop de la domiciliu.

Pentru a putea constitui în timp scurt aceste echipe este necesară organizarea unui sistem corespunzător, începînd cu „serviciul la domiciliu" pentru un anumit număr de persoane, incluzînd obligatoriu 1—2 șoferi și manipulanți de automacarale și continuînd cu asigurarea unui stoc de materiale de intervenție și a unor utilaje corespunzătoare: scări,

escoape, mașini de forat, trolii, dispozitive de întins conductoare, pozitive pentru înlocuirea lanțurilor de izolatoare etc.
Modul de organizare al intervențiilor este descris amănunțit în cap. 7.6.

7.2. METODE DE LOCALIZARE ȘI DE REMEDIERE A DEFECTELOR ÎN LINIILE ELECTRICE SUBTERANE

7.2.1. Localizarea și remedierea preventivă a defectelor

La liniile electrice subterane, detectarea preventivă a defectelor e mai dificilă din cauză că în cea mai mare parte a traseelor, cablue sînt îngropate, deci nu sînt accesibile supravegherii directe. Totuși istă multiple posibilități de detectare preventivă a unor defecte prin pravegherea traseului și a capetelor terminale și prin efectuarea unor ăsurători și probe profilactice.

Supravegherea traseului permite depistarea din timp a unor tasări teren sau a unor lucrări (de exemplu: săpături, excavații), care pot ne în pericol liniile subterane prin solicitări mecanice sau tăiere.

Supravegherea traseului poate scoate în evidență și eventuale depozări sau scurgeri de substanțe care pot pune în pericol liniile subterane in acțiuni corozive. În acest sens, în tabelul 7.1 se arată rezistența or materiale folosite pentru mantalele cablurilor, respectiv pentru otecția mantalelor de plumb, față de acțiunea unor agenți corozivi re pot să apară în apropierea traseelor liniilor electrice subterane.

Supravegherea cutiilor terminale și a manșoanelor de legătură permite nstatarea pierderilor de ulei, fenomen deosebit de periculos la cablue cu izolație de hîrtie impregnată cu masă (ulei + colofoniu), deoarece

Tabelul 7.1

Agresivitatea solului față de plumb și oțel în funcție de pH

pH	Aciditate sau alcalinitate	Agresivitate	
		față de plumb	față de oțel
4	extrem de acid	foarte agresiv	foarte agresiv
4 –4,5	foarte acid	—	
4,5–5	acid	puțin agresiv	agresiv
5 –6	moderat acid		
6,5–7,5	neutru	neagresiv	neagresiv
7,5–8,5	slab alcalin		
8,5	foarte alcalin	foarte agresiv	puțin agresiv

Comportarea unor materiale de protecție în diverse soluri

Rezistivitatea soiului, μm	100	100 – 20	20 – 5	5
PVC	bună	bună	bună	mediocră
Iută	bună	mediocră	slabă	slabă

pH	4	4 – 4,5	4,5 – 5	5 – 6	6,5 – 7,5	7,5 – 8,5
PVC	mediocră		bună		bună	
Iută	slabă		mediocră		bună	mediocră

la aceste cabluri pierderile de ulei nu se compensează din rezervoare și zonele uscate își pierd rapid calitățile mecanice și electroizolante. Se menționează că zonele expuse deteriorării în aceste cazuri nu sînt cele în care se constată pierderi de ulei, ci tocmai zonele corespunzătoare celuilalt capăt, deoarece uleiul se scurge într-un regim asemănător vaselor comunicante (v. § 5.2.1, fig. 5.21).

La cabluri de înaltă tensiune, cu ulei lichid sub presiune, pierderile de ulei se constată la rezervoarele de compensare iar pînă la remedierea locului defect, pierderile pot fi compensate prin completare.

Un număr important de defecte poate fi prevenit prin măsuri „profilactice" și anume prin măsurări cu privire la starea izolației și măsurări cu privire la pericolul de coroziune electrolitică.

Măsurările profilactice ale izolației se pot grupa în două categorii principale:

— măsurări efectuate la tensiuni mici, deci fără solicitarea izolației;

— măsurări efectuate la tensiuni mari, deci cu riscul deteriorării izolației.

Măsurări efectuate la tensiuni mici. Măsurarea rezistenței de izolație se face cu megohmmetrul de 1 000, 2 500 sau 5 000 V. Se preferă măsurările făcute la tensiuni mai mari pentru că numai astfel se obține o sensibilitate suficient de mare.

Rezistența de izolație a unei linii subterane măsurată astfel este compusă din rezistențele de izolație ale cablului și ale accesoriilor (cutii terminale, manșoane) legate în paralel (fig. 7.21)

$$R_{ech} = \frac{1}{\frac{1}{R_{CT_1}} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{CT_2}}}. \qquad (7.18)$$

Din aceste rezistenţe, cele corespunzătoare cutiilor terminale sînt terminate în cea mai mare măsură de starea suprafeţelor izolante (de gă). De aceea este deosebit de important ca în timpul acestei măsurări prafeţele respective să fie cît mai curate şi uscate.

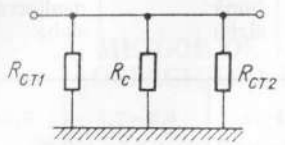


Fig. 7.21. Rezistenţele de izolaţie ale unui cablu.

Pentru orientare se dau în tabelul 7.2 valori ale rezistenţelor de izola-e, corespunzătoare cablurilor cu izolaţie de hîrtie şi PVC, pentru ten-unile medii uzuale. Se menţionează că acestea dau numai componentele

Tabelul 7.2

Valori ale rezistenţelor de izolaţie la cabluri de medie tensiune

S mm²	Izolaţie hîrtie			Izolaţie PVC	
	6 kV	10 kV	20 kV	6 kV	10 kV
50	400		700	100	90
70—150	300		500	60	60
150	200		500	40	40

otă: Valorile sînt date pentru temperatura de 20 °C. La 70° C aceste valori se reduc astfel:
— la hîrtie, de 0,07 ori;
— la PVC, de 0,006 ori.

e din relaţia (7.18), deci rezistenţa de izolaţie măsurată a unui cablu a fi totdeauna mai mică şi abaterea va fi cu atît mai importantă, cu cît ngimea cablului este mai redusă. De aceea, ca valoare de referinţă se ia e obicei rezistenţa de izolaţie măsurată la punerea în funcţiune a cablului, sigurîndu-se cu această ocazie starea perfect uscată a cutiilor terminale.

Scăderea în timp a rezistenţei de izolaţie la cablurile cu izolaţie de îrtie, semnalizează pierderea masei de impregnare şi absorbţie de apă ı izolaţie.

La cablurile cu izolaţie PVC, scăderea rezistenţei de izolaţie semnali-ează infiltraţie de apă în lungul vinelor cablului.

Măsurarea tg δ se face cu ajutorul punţii SCHERING, la mai multe epte de tensiune; de obicei la 0,5 U_0; U_0 şi $2U_0$ (U_0 este tensiunea ominală/$\sqrt{3}$). Curba de variaţie a tg $\delta = f(U)$ (fig. 7.22) arată, atît în alura sa cît şi din valorile măsurate, apariţia unor fenomene de deteri-

orare a izolaţiei şi anume degradarea materialului izolant (de exemplu umezire), care este marcată prin creşterea valorilor tg δ şi apariţia unor defecte locale (de exemplu discontinuităţi în izolaţie), care se marchează prin inflexiuni ale curbei tg $\delta = f(U)$.

Atît măsurarea rezistenţei de izolaţie, cît şi a tg δ se fac la solicitări ale izolaţiei mult reduse faţă de valorile la care se poate aştepta o străpungere, deci pot fi efectuate des, fără riscuri, dar nu pot scoate în evidenţă

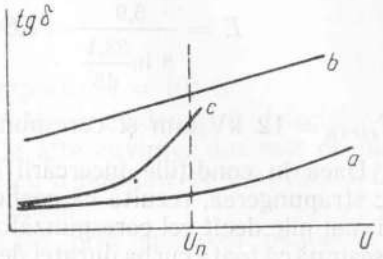


Fig. 7.22. Curba de variaţie tg $\delta = f/U$: *a* — cablu în stare normală; *b* — izolaţie umedă; *c* — izolaţie cu discontinuităţi.

decît unele aspecte parţiale ale unor viitoare defecţiuni. De aceea în ţara noastră, ca şi în cele mai multe ţări se folosesc în prezent metode de încercare preventivă prin măsurători efectuate la tensiuni mari, care provoacă deteriorarea izolaţiei în locurile în care aceasta este slăbită din anumite motive.

Încercările cu tensiune mărită se bazează pe următoarea idee: un defect incipient, local, de exemplu pierdere de ulei prin crăpături ale mantalei de plumb sau deteriorarea izolaţiei dintr-un manşon de legătură, ca urmare a supraîncălzirii unei cleme, va conduce după un timp oarecare inevitabil la străpungerea izolaţiei în locul respectiv. Dacă această străpungere apare în timpul încercării preventive, consumatorii nu vor suferi deloc, rămînînd în continuare alimentaţi din cealaltă buclă a cablului, iar operaţia de remediere va decurge mult mai repede, echipele fiind pregătite la faţa locului pentru intervenţie în momentul începerii încercării.

Încercările preventive se fac cu tensiune mărită, de curent continuu, la valori de 3—5 ori tensiunea nominală, deci cu o mare rezervă faţă de tensiunea de străpungere. Astfel, la un cablu de 10 kV, cu secţiunea $s = 150$ mm² avînd grosimea izolaţiei de 4,2 mm, tensiunea de străpungere în curent continuu este de cca.

$$E_{străp} = 120 \text{ kV/mm} = \frac{U_{străp}}{8 \ln \frac{23,4}{15}}$$

de unde

$$U_{străp} = 430 \text{ kV}.$$

Rezultă că, dacă în timpul probei se aplică tensiunea de 30 kV (3 U_n), eficientul de siguranță față de tensiunea de străpungere este de

$$k_s = \frac{430}{30} = 14,$$

ea ce este mult mai mare decît coeficientul de siguranță proiectat al blului

$$E = \frac{5,9}{8 \ln \frac{23,4}{15}} = 1,64 \text{ kV}_{ef}/\text{mm}; \quad k_s = \frac{12}{1,64} = 7$$

$_{străp} = 12$ kV/mm și corespunde la o durată de viață de 10^6h).

Dacă în condițiile încercării în curent continuu ($t = 0,5 \ldots 1$ h) are c străpungerea, rezultă că coeficientul real de siguranță este de cca. 14 i mai mic decît cel corespunzător stării normale (de proiectare). Aceasta seamnă că toată curba duratei de viață a cablului ($E_{străp}=f(t)$ din fig. 7.23) te redusă proporțional, deci intensității cîmpului de 1,64 kV_{ef}/mm

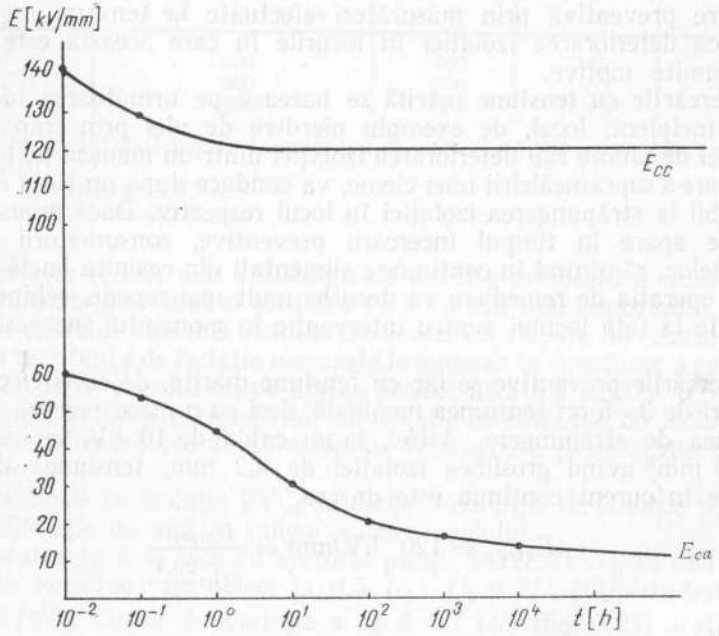


Fig. 7.23. Curbe de viață ale izolației.

(care apare în dielectric în regim normal) îi corespunde durată de viață de mai puțin de 10^2h, deoarece $1,64 \times 14 = 23$ kV/mm și prin urmare $t = (0,5 \ldots 1) \cdot 10^2$h.

Încercînd deci cablul în curent continuu la 3 U_n se evidențiază defectele ce puteau apare în *următoarele săptămîni*.

Mărindu-se tensiunea de încercare la 5 U_n timpul de „previziune" se ărește, după cum rezultă din următorul calcul:

$$k_s = \frac{430}{50} = 8,4;$$

$E \cdot k_s = 1,64 \times 8,4 = 13,8$ kV/mm și respectiv $t = 10^5$ h.

Deci încercînd același cablu cu 50 kV, se evidențiază defectele ce puteau apare în următoarele 12 luni. Cu alte cuvinte, din cele de mai sus, rezultă interesul de a încerca cablul cu o tensiune de cel puțin 5 U_n pentru a avea o rezervă de timp acceptabilă.

Temerile față de îmbătrînirea izolației prin aplicarea periodică a tensiunii de încercare, în aparență mare, sînt neîntemeiate deoarece procesul de îmbătrînire a izolației nu apare la tensiunea continuă decît la intensități de cîmp foarte mari (130...140 kV/mm); după cum se vede și din fig. 7.23, începînd cu 120 kV/mm rigiditatea dielectrică nu mai scade în timp.

În cazul probei cu curent continuu de înaltă tensiune, deteriorarea izolației se manifestă în două feluri. În primul rînd prin străpungerea netă: în acest caz defecțiunea este clară și urmează stabilirea locului defect și repararea acestuia. În al doilea rînd, prin apariția unor curenți de fugă relativ mari, în raport cu lungimea cablului (tabelul 7.2).

În aceste cazuri, de obicei defectul nu apare încă, însă va trebui acordată o atenție deosebită tronsonului de cablu respectiv, la care ne putem aștepta să se deterioreze în cadrul proximei încercări.

7.2.2. Localizarea și remedierea defectelor în cazuri de avarii în liniile electrice subterane

Deteriorarea unei linii de cablu poate să apară în timpul funcționării normale sau în cadrul încercărilor preventive ale izolației. Găsirea locului defect este o problemă deosebit de dificilă deoarece pe majoritatea traseelor cablu este îngropat în sol.

Practica remedierii defectelor arată că din timpul total necesar restabilirii funcționării unui cablu defect, mai mult de 75% este timpul necesar găsirii locului defect, deci tehnica localizării defectelor prezintă o importanță deosebită.

În mod analog cu cazul liniilor aeriene și la liniile subterane se face primă delimitare a porțiunii defecte, bazat pe indicațiile protecției rin relee și a clapetelor de semnalizare la scurtcircuite (fig. 7.24 și 7.25).

Astfel, în cazul fig. 7.24 (rețea radială), declanșarea întreruptorului n PA și indicațiile clapetelor de scurtcircuit declanșate în PT_1 și PT_2, ar nedeclanșate în PT_3, delimitează locul defect pe tronsonul PT_2—PT_3. ı cazul fig. 7.25 (rețea buclată), declanșarea prin protecția diferențială au direcțională temporizată) delimitează tronsonul defect ca fiind fiderul dintre PA_1 și PA_2.

Se subliniază aci eficiența deosebită a clapetelor de semnalizare scurtcircuit și importanța restabilirii imediate a poziției normale a estora după orice scurtcircuit (deoarece dacă după o acționare la scurtrcuit nu se readuc în poziția inițială, la următorul scurtcircuit indicaile nu mai sînt utilizabile).

Tronsonul defect fiind delimitat, urmează indentificarea locului deteorării. În acest sens prima operație constă în stabilirea tipului defecului: scurtcircuit fază-pămînt, fază-fază, cu sau fără întreruperea ontinuității fazei, deoarece metoda de localizare este în funcție de tipul efectului.

În principiu, defectele cu întreruperea fazei se pot determina măsurînd apacitatea fazei respective și raportînd această capacitate la valoarea

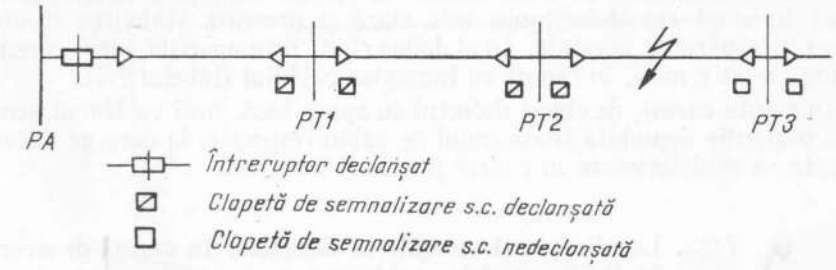


Fig. 7.24. Semnalizarea unui defect într-o rețea radială.

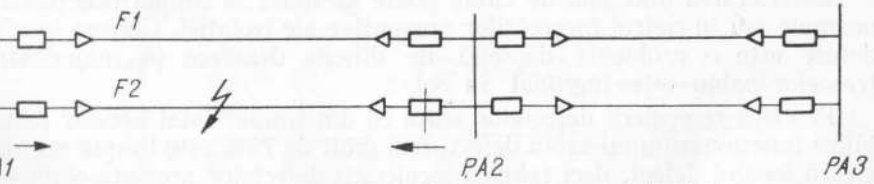


Fig. 7.25. Semnalizarea unui defect într-o rețea buclată.

normală, corespunzătoare întregii lungimi a traseului. Distanța pînă la locul defectului (X) rezultă din:

$$X = \frac{C_x}{C_L} L, \tag{7.19}$$

unde: C_x este capacitatea fazei defecte (întrerupte);
C_L — capacitatea fazei sănătoase;
L — lungimea tronsonului întreg.

Măsurarea capacității se face cu ajutorul unei punți portative pentru capacități (cu domeniul 0,01—2 μF). Avînd în vedere producerea impreciziei inerente tehnicii de măsurare, se fac de obicei cel puțin două determinări de la cele două capete ale cablului, verificarea făcîndu-se prin suma $C_{x1} + C_{x2} = C_L$.

Localizarea fazei întrerupte este posibilă cu ajutorul metodei de măsurare a capacității numai atunci cînd defectul este net (întreruperea totală), rezistența de izolație nu este nulă și traseul cablului este bine cunoscut. Folosind metoda inducției, devine posibilă localizarea întreruperii unei faze și atunci cînd unele din aceste condiții nu sînt îndeplinite.

Principiul metodei constă în emiterea unor semnale pe faza defectă, folosind o tensiune de frecvență medie (audiofrecvență) și recepționarea semnalelor respective cu ajutorul unei antene-cadru și a unui amplificator-receptor care se plimbă în lungul traseului (fig. 7.26).

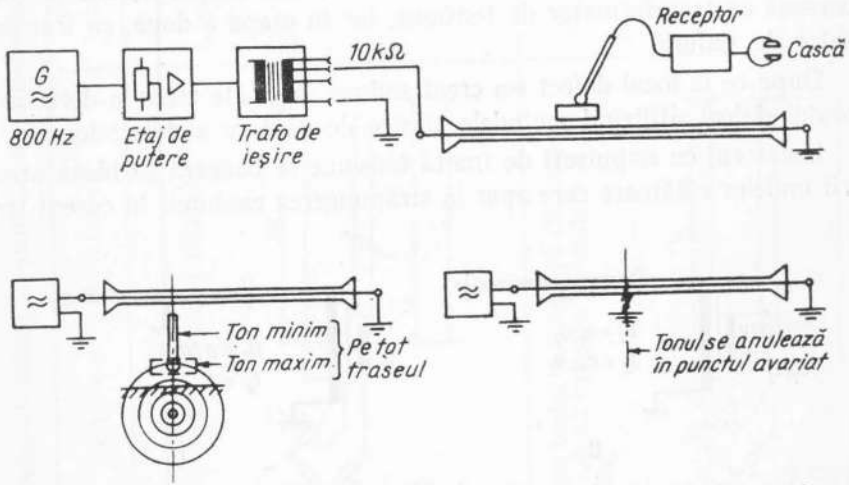


Fig. 7.26. Căutarea traseului unui cablu cu ajutorul unui emițător de semnale.

Cu ajutorul acestei metode este posibilă și precizarea traseului cablu-ii în cazurile (destul de frecvente) cînd acest traseu nu este precis ınoscut.

Defectele de izolație (scurtcircuit fază-pămînt sau fază-fază) se de-ermină cu ajutorul metodelor de buclă, bazate pe puntea Wheatstone. ı tabelul 7.3 sînt prezentate principalele scheme și relații de calcul olosite.

Se menționează aci că metodele de localizare bazate pe folosirea pun-i Wheatstone sînt utilizabile numai în cazurile în care defectul de izo-ație este net (cu rezistență mică). În majoritatea cazurilor însă defectul e izolație nu este net și are o rezistență mare. Pentru găsirea locului efect în astfel de situații se poate proceda la reducerea rezistenței la ocul de defect prin arderea cablului sau folosind locator de defecte bazat e impulsuri de înaltă tensiune.

Reducerea rezistenței la locul defectului se poate obține folosind așa-umitele *transformatoare de ardere a defectelor*. Acestea sînt transforma-oare care pot funcționa în două regimuri succesive distincte și anume: ntr-o primă etapă, transformatorul alimentează faza defectă cu tensi-ne progresivă, pînă la străpungere, apoi, în a doua etapă, transforma-orul alimentează locul defect cu un curent suficient de mare pentru a rea o punte sudată (fig. 7.27). Deci, într-o primă etapă, transformatorul ucrează ca transformator de tensiune, iar în etapa a doua, ca transfor-ator de sudură.

După ce la locul defect s-a creat sudura, se poate trece la detectarea ocului defect utilizînd metodele clasice de căutare a defectelor.

Locatorul cu impulsuri de înaltă tensiune se bazează pe ideea urmă-irii undelor călătoare care apar la străpungerea cablului, în curent con-

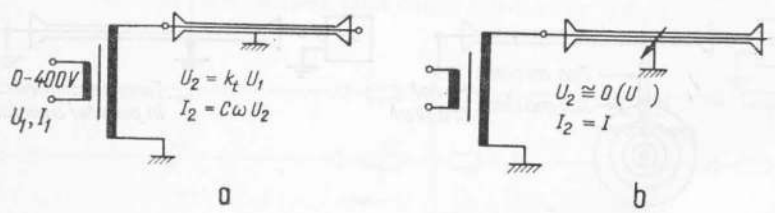
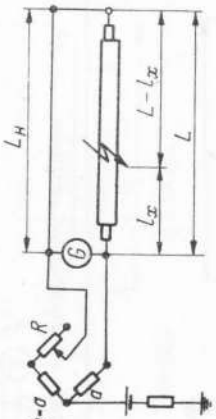
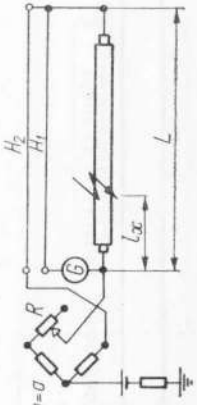


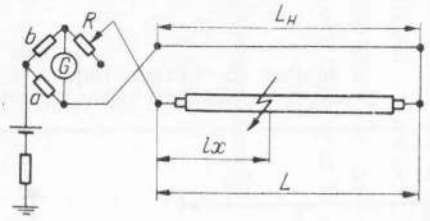
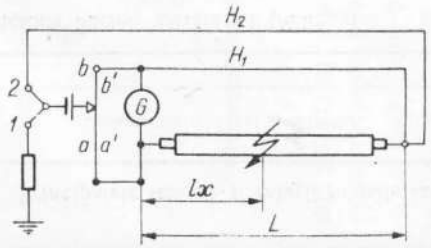
Fig. 7.27. Regimurile transformatorului de ardere a defectelor în cabluri.

Tabelul 7.3

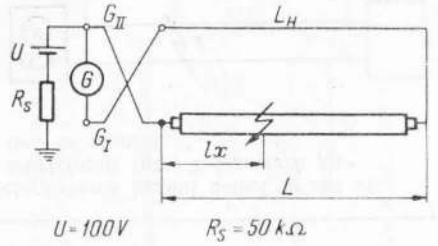
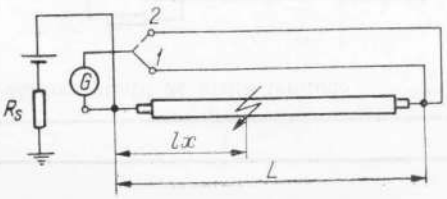
Principalele scheme și relații folosite la determinarea locului defect în cabluri, cu ajutorul metodelor de buclă

Nr. crt.	Denumirea metodei și schema	Relația de calcul	Observații cu privire la domeniul de utilizare
0	1	2	3
1	Metoda buclei, varianta I (Murray) 	$l_x = \frac{R}{R+a}(L + L_H)$	Se folosește în caz de punere la pămînt Necesită fir auxiliar de lungime L_H
2	Metoda buclei, varianta YI (Murray), la cabluri trifazate, de secțiune mare. 	$l_x = L \frac{R}{R+a}$ cu condiția ca H_2 să fie neglijabil față de a	Se folosește la cabluri trifazate, de secțiune mare, la puneri la pămînt a unei faze Nu necesită fire auxiliare (H_1 și H_2 sînt fazele sănătoase ale cablului)

Tabelul 7.3 (continuare)

0	1	2	3
3	Metoda buclei, varianta II (Varley) 	$l_x = L\dfrac{b(L+L_H)-aL_R}{a+b}$ $L_R = 57\dfrac{R}{S}$ S – secțiunea cablului cercetat dacă $a = b$ și $L_H = L$ $l_x = \dfrac{1}{2}(2L - L_H)$	Se folosește la cabluri cu rezistență mare
4	Metoda conductoarelor auxiliare 	Echilibru în poz. 1 → a Echilibru în poz. 2 → a^1 $l_x = \dfrac{a}{a^1}L$	Se folosește dacă nu se cunoaște L_H Necesită două măsurători (comutatorul în poz. 1 resp. poz. 2)

Tabelul 7.3 (continuare)

0	1	2	3
5	Metoda căderii de tensiune la cabluri cu rezistență mare 	$l_x = \dfrac{\alpha_1}{\alpha_1+\alpha_2}(L+L_H)$ α_1 – deviația galvanometrului, cu legătu.ile G_I G_{II} ca în figură ; α_2 – deviația galvanometrului, pentru legăturile G_I G_{II} inversate de figură	Se folosește la cabluri cu rezistență mare Se fac două măsurări. Măsurarea 1 cu legăturile G_I G_{II} ca în figură (α_1). Măsurarea 2, cu legăturile G_I G_{II} inversate (α_2)
6	Metoda căderii de tensiune la cabluri cu rezistență mică 	$l_x = \dfrac{\alpha_1}{\alpha_1+\alpha_2}L_1$ α_1 – deviația galvanometrului la măsurarea în punctul 1 ; α_2 – deviația galvanometrului de măsurare în punctul 2	Se folosește la cabluri trifazate cu rezistență mică (cele 2 conductoare auxiliare sînt cele 2 faze sănătoase ale cablului)

0	1	2	3
7	Folosirea punții de înaltă tensiune	Relațiile de calcul sînt în funcție de schema folosită (Murray, Varley etc.)	Se folosește la defecte imperfecte ale cablurilor de înaltă tensiune. Echilibrarea punții se face în timp ce străpungerea izolației se menține prin tensiunea de încercare (T — transformator; K — kenotron).
8	Determinarea locului defect în caz de scurtcircuit între 2 faze fără punere la pămînt	$l_x = \frac{R_1 - R_2 + R_3}{4r}$.	Se fac 3 măsurări, cu ajutorul unei punți Wheatstone simple $R_1 = 2rl_x + X$; $R_2 = 2r(L - l_x) + X$; $R_3 = 2rl$

tinuu (fig. 7.28). Dacă în momentul t_0 apare o străpungere, aceasta se transmite sub forma unei unde $u = 0$, cu viteza v spre ambele capete ale cablului. Unda ajunge la capătul cablului în momentul t_1, de unde se reflectă și se propagă înapoi sub forma $-u$ pînă la locul defectului, unde ajunge în momentul t_2. Acolo provoacă o nouă străpungere și se întoarce sub forma $u = 0$ la începutul cablului unde sosește la momentul t_3. Instalînd la începutul cablului un cronometru electronic care se pornește și se oprește prin impulsuri date de $\frac{du}{dt}$, acesta va porni la $t_1\left(\frac{du}{dt} = -2u\right)$ și se va opri la $t_3\left(\frac{du}{dt} = 2u\right)$, indicînd $T = t_3 - t_1$.

Distanța pînă la locul defectului se obține din relația

$$x = \frac{vT}{2} \tag{7.21}$$

unde :

$$v = \frac{10^3}{\sqrt{LC}}\ [\mathrm{m}/\mu\mathrm{s}] \tag{7.22}$$

L — inductivitatea cablului, în mH/km;
C — capacitatea cablului, în nF/km.

Fig. 7.28. Principiul de funcționare a locatorului de defect cu impulsuri de înaltă tensiune.

Toate dispozitivele de detectare descrise mai sus determină numai u aproximaţie distanţa pînă la locul defectului. Detectarea exactă nece- tă dezgroparea cablului în zona defectă şi — uneori — utilizarea meto- elor acustice, bazate pe urmărirea cu amplificatoare acustice a sunetu- ui ce apare la străungerea din locul defectului.

Pentru remedierea defectului se procedează în funcţie de locul şi atura acestuia. În cazurile în care defectul este în cutia terminală sau n manşonul de legătură, acesta se demontează şi se reface. Dacă defectul ste în cablu, porţiunea defectă se înlocuieşte cu o porţiune nouă, cu- rinsă între două manşoane. Se menţionează că în cazul defectării ac- esoriilor turnate în răşină, acestea trebuie complet înlocuite, refacerea or nefiind posibilă.

7.3. METODE MODERNE DE LOCALIZARE ŞI PREVENIRE A AVARIILOR ÎN STAŢIILE DE TRANSFORMARE ŞI DE CONEXIUNE

Necesitatea prevenirii precum şi a localizării cît mai rapide a avariilor, orelat cu ridicarea permanentă a economicităţii funcţionării staţiilor le transformare şi de conexiune, au condus la stabilirea unor măsuri prin are se pot realiza aceste deziderate.

7.3.1. Calculatoarele de proces

Calculatoarele de proces pot comanda diferite operaţii, aşa cum sînt : nanevre pe bază de program, blocaje, descărcarea automată a sarcinii, omutarea ploturilor transformatoarelor şi reglajul automat al tensiunii, nanevre ale condensatoarelor statice, înregistrarea şi cumularea datelor, nregistrarea evenimentelor, pornirea şi oprirea ventilatoarelor trans- ormatoarelor în funcţie de temperatură, ş.a. [7.10].

Calculatoarele de proces [7.11], sînt în strînsă corelare cu conducerea perativă prin dispecer, existînd în principiu două sisteme :

— un sistem radial, în care la nivelul treptei de dispecer superioară xistă un calculator central, care este în legătură directă cu toate sta- iile de transformare ;

— un sistem grupat, în care există un calculator central la nivelul reptei de dispecer superioară şi mai multe calculatoare zonale, ultimele iind legate pe de o parte cu calculatorul central iar pe de altă parte cu staţiile de transformare din zonă.

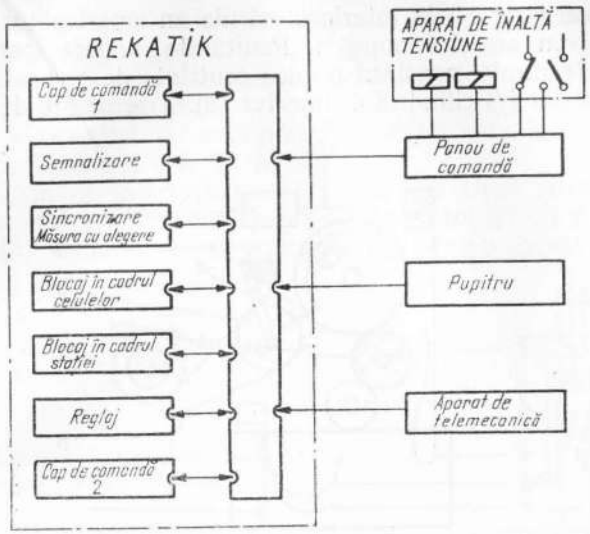


Fig. 7.29. Schema generală a sistemului REKATIK.

În S.U.A, Japonia, R.F.G. calculatoarele de proces au rol de comandă şi informare, iar în Franţa şi Anglia au rol numai de informare, telemecanica fiind rezolvată în sistem clasic, prin intermediul punctelor de comandă centralizată.

Un exemplu de calculator de proces este cel realizat în ultimii ani de Telefunken [7.12] cunoscut sub denumirea de REKATIK (fig. 7.29). Sistemul este destinat telecomenzilor, telemăsurilor şi telesemnalizărilor staţiilor de transformare.

7.3.2. Aparate de înregistrare a fenomenelor

Pentru a putea depista locul defectului şi a analiza fenomenele care au avut loc, au fost construite o serie de aparate, cu înregistrarea pe peliculă sau pe bandă magnetică a acestor fenomene, cele mai perfecţionate fiind osciloperturbograful, oscilodatul şi oscilostorul.

Osciloperturbograful este un aparat capabil să înregistreze, pe o hîrtie specială, fenomenele tranzitorii care au loc în timpul unui incident. Principiul lui de funcţionare rezultă din fig. 7.30.

Cilindrul de inscripţionare (*1*), antrenat de un motor, se roteşte în permanenţă cu o rotaţie constantă. El este acoperit permanent cu o peliculă de cerneală specială, graţie unui dispozitiv constituit dintr-un

mector de cerneală (*4*) în interiorul căruia un amestecător (*7*) menține erneala într-un amestec omogen. Peniţa de ungere permanentă cu erneală (*5*) transmite constant o mică cantitate de cerneală din umec-orul de cerneală (*4*) cilindrului umector (*3*). Trei peniţe de înregistrare

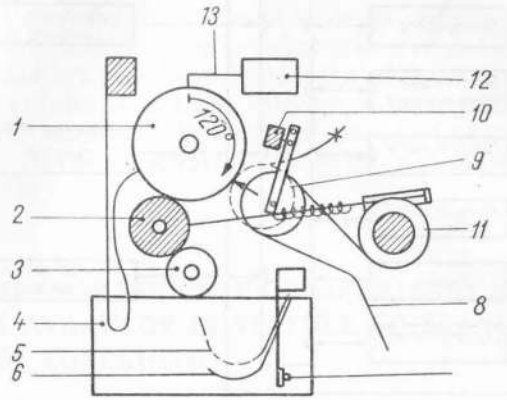


Fig. 7.30. Schema de funcţionare a osciloperturbografului.

6) aduc cerneală în timpul perioadei de înregistrare. Cilindrul umec-or cu cerneală (*3*) repartizează uniform cerneala pe toată suprafaţa ilindrului de cauciuc (*2*) iar cilindrul de cauciuc (*2*), şterge urmele tra-ate pe cilindrul de inscripţionare (*1*) şi îl acoperă cu o peliculă subţire le cerneală. Cele două raclete îndepărtează excesul de cerneală ce se ormează la extremităţile cilindrului de inscripţionare (*1*). Periuţele echi-ajelor (*13*) trasează neîncetat urme pe cilindrul de inscripţionare (*1*), rme care sînt şterse, iar pelicula de cerneală este refăcută, după ce cilin-lrul de înregistrare a efectuat cca. 190°C.

În condiţiile producerii unui incident, al cărui început este depistat le protecţiile din celula sau celulele supravegheate de osciloperturbo-graf, se pune instantaneu în funcţie cilindrul de pîslă (*9*), de aplicare a îrtiei pe cilindrul de inscripţionare, care trece din poziţia desenat cu inie plină în poziţie desenat cu linie punctată, iar hîrtia specială de în-egistrare (*8*) preia amprentele trasate pe cilindrul de inscripţionare (*1*). Hîrtia înregistrează astfel situaţia elementelor supraveghiate cu cca.),5 s înainte de producerea fenomenului, care corespunde rotirii cu 120° cilindrului de inscripţionare şi în continuare dezvoltarea fenomenului.

Viteza de derulare a hîrtiei de înregistrare (*8*) este de 14 cm/s, ar timpul de înregistrare este reglabil şi se poate fixa după dorinţă, pe na din poziţiile de 5, 15, 25, 35, 45, 55 sau 65 s. Pentru a se putea pro-oca o nouă înregistrare, după epuizarea perioadei prefixate, aparatul

necesită un timp de 200 m·s. Cînd aparatul începe să funcţioneze pe înregistrare, se aprinde un bec roşu, care poate fi readus în poziţia stins prin apăsarea unui buton, după ce personalul de tură a preluat oscilo-perturbograma înregistrată.

Elementul esenţial al osciloperturbografului este echipajul, al cărui mod de funcţionare este redat în fig. 7.31.

Pe cilindrul de inscripţionare (*1*) antrenat cu o viteză minimă de motorul (*5*), înscriu permanent peniţele pentru topuri (*2*) şi peniţa pentru oscilograf (*3*). Echipajul (*4*) cuprinde un electromagnet central, care

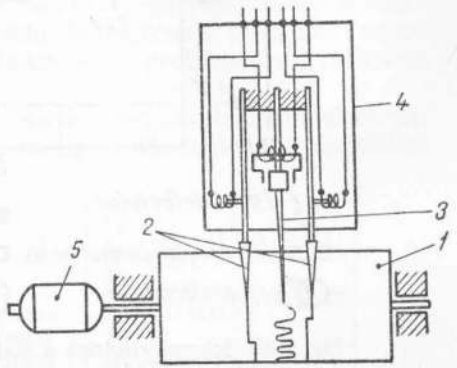


Fig. 7.31. Modul de funcţionare a echipajului osciloperturbografului.

face să vibreze peniţa osciloperturbografului corespunzător mărimilor caracteristice, ale tensiunii sau curentului de măsurat. El cuprinde de asemenea, de o parte şi de alta a peniţei oscilografului, cîte o peniţă pentru topuri, ale căror electromagneţi, la modificarea stării electrice a lor, le fac să devieze de la linia dreaptă pînă la reluarea stării iniţiale. Aceste peniţe pentru topuri înregistrează momentele şi duratele de demarare ale protecţiilor şi de declanşare a dispozitivelor de acţionare ale întreruptoarelor.

Un osciloperturbograf cuprinde opt asemenea echipaje, putînd înregistra 8 sinusoide şi 14 topuri.

Pentru exemplificarea modului de funcţionare al osciloperturbografului se redă un caz concret. În staţia de transformare ST_2 este montat un osciloperturbograf (fig. 7.32). Această staţie este încadrată în sistemul electroenergetic de staţiile de transformare ST_1 şi ST_3.

A declanşat linia *1* între ST_1 şi ST_2 (un izolator a conturnat pe această linie) şi linia *2* în ST_1. Osciloperturbograful montat în staţia de transformare ST_2 a înregistrat pe hîrtie specială, osciloperturbograma arătată în fig. 7.33.

În dreapta acestei osciloperturbograme s-au notat elementele înregistrate prin:

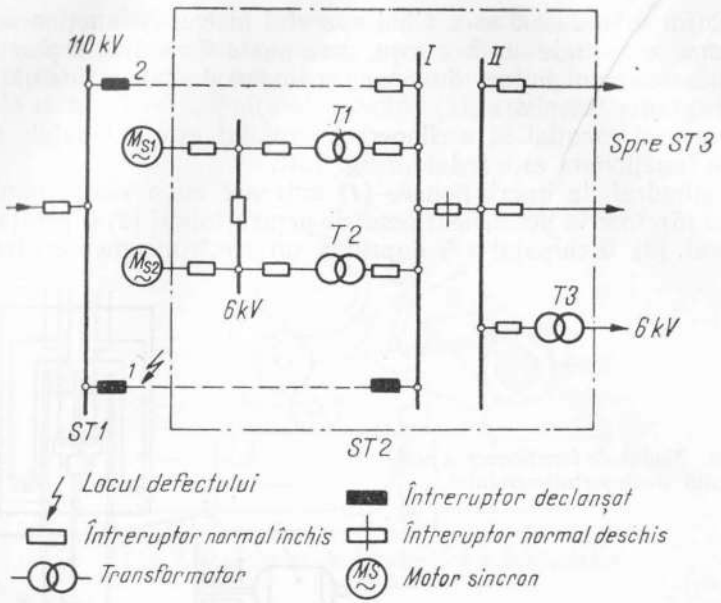


Fig. 7.32. Schema electrică a stației de transformare ST_2, încadrarea ei în sistem și evenimentele care au avut loc.

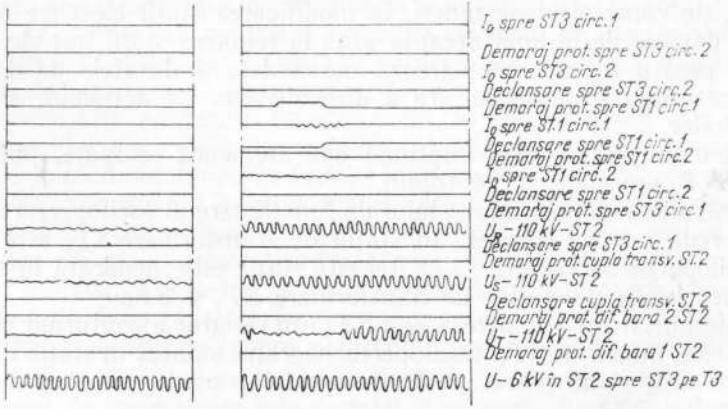


Fig. 7.33. Cscilloperturbograma rezultată ca urmare a incidentului descris în fig. 7.32.

— I_0 — curentul homopolar care a apărut (sistemul are neutrul legat direct la pămînt);

— demarajul sau declanșările, topurile arătînd timpul de funcționare a protecțiilor respectiv de declanșare a întreruptoarelor;

— tensiunea pe fază.

Spre stînga oscilloperturbogramei apare scăderea tensiunii pe cele trei faze, ca urmare a faptului că ea era încă susținută de existența motoarelor sincrone (*MS*) din fig. 7.32.

Alte aparate care îndeplinesc aceleași funcțiuni ca și oscilloperturbograful sînt· oscilodatul și oscilostorul.

Oscilodatul [7.10] înregistrează pe bandă magnetică mărimile electrice urmărite. Avînd un număr mai mic de angrenaje mecanice, uzura aparatului este mult mai mică decît la un oscilloperturbograf. Numărul uzual de canale este de 7 sau 14.

Oscilostorul [7.14] înregistrează pe hîrtie specială tensiuni electrice, forma de imprimare fiind cea redată în fig. 7.34, unde se exemplifică

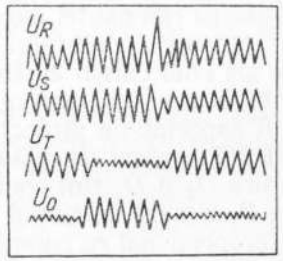


Fig. 7.34. Oscilostor. Oscilloperturbograma tensiunilor, în cazul unei puneri la pămînt într-o rețea de înaltă tensiune, cu neutrul tratat prin bobină.

înregistrările valorilor de tensiune obținute U_R, U_S, U_T și U_0, în cazul unei puneri la pămînt într-o rețea cu neutrul tratat prin bobină.

7.3.3. Măsuri pentru evitarea efectelor principalelor fenomene tranzitorii și staționare

Fenomenele tranzitorii și staționare care au loc în momentul punerii sub tensiune a unui transformator, sau producerii unui scurtcircuit, sau al punerii sub tensiune a unei instalații cu nesimultaneitate de timp la închiderea fazelor întreruptorului, pot provoca o funcționare incorectă a protecțiilor prin relee.

În primul moment al punerii sub tensiune a unui transformator, curentul de magnetizare poate atinge valori de 6 și chiar 10 ori curentul nominal. Aceleași valori pot fi atinse și în regim de avarie, în momentul cînd se restabilește valoarea tensiunii la borne, după un scurtcircuit. Curentul de magnetizare, atît prin valoarea lui ridicată cît și prin asime-

izarea ce apare din cauza transformatorului de putere şi a transforma-
oarelor de curent, poate conduce la demararea eronată a protecţiei dife-
enţiale longitudinale a transformatorului în cauză. Împotriva acestei
ncţionări eronate se iau măsuri de blocare a funcţionării protecţiei
iferenţiale longitudinale, care ţin seama de particularităţile şocului dat
e curentul de scurtcircuit.

Aceste blocaje se realizează prin temporizarea protecţiei, prin blo-
are electromagnetică, prin utilizarea principiului rezonanţei mecanice
au prin introducerea unor filtre electrice.

Temporizarea protecţiei diferenţiale longitudinale constă fie în acor-
area unui timp de lucru de 0,5—0,7 s, fie a unui timp de lucru de
,04—0,06 s, în ultimul caz aplicîndu-se şi o micşorare a curentului de
ornire a protecţiei. Metoda prezintă dezavantaje prin reducerea eficaci-
ăţii protecţiei diferenţiale.

Blocarea electromagnetică se poate realiza prin utilizarea în schemă
unor transformatoare cu saturaţie rapidă, combinate cu relee de timp
RDS.

Utilizarea rezonanţei mecanice se bazează pe observaţia făcută după
are, alternanţele curentului aperiodic de magnetizare sînt asemănătoare
u cele ale unui curent cu frecvenţa de 25 per/s. Utilizînd deci un releu
nsensibil la această frecvenţă, şocul dat de curentul de magnetizare va
utea fi suportat de protecţia diferenţială. Un asemenea releu este cel
e tip R21T, a cărui schemă este indicată în fig. 7.35. Cele două elemente
e măsură D_1 şi D_2 sînt conectate între două punţi redresoare P_1 şi P_2.
Puntea P_1 asigură un curent proporţional cu curentul de lucru iar P_2 un
urent proporţional cu curentul de frînare. Cele două punţi sînt montate
n opoziţie. În circuitul curentului de frînare se află un releu interme-

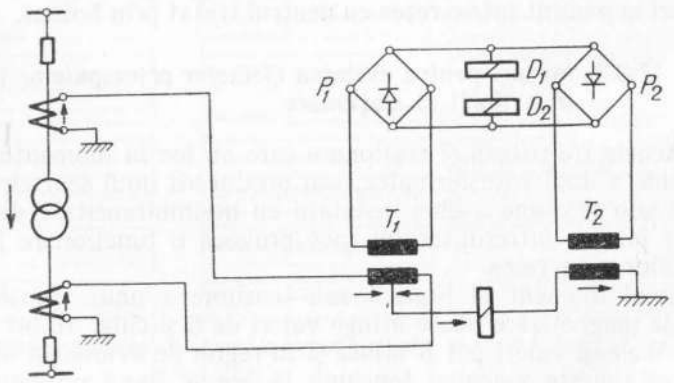


Fig. 7.35. Schema releului diferenţial R 2 IT.

diar care intră în rezonanţă la frecvenţa de 25 per/s, asigurînd astfel blocarea releului la şocul dat de curentul de magnetizare.

Filtrele electrice se bazează pe conţinutul ridicat în armonici superioare a curentului de magnetizare, blocînd funcţionarea protecţiei în aceste condiţii.

În staţiile de transformare, în timpul manevrelor în instalaţii sau la declanşări ca urmare a unor scurtcircuite, apar fenomene tranzitorii de comutaţie în circuitele primare care pot influenţa funcţionarea corectă şi chiar integritatea circuitelor secundare.

Fenomenele tranzitorii de comutaţie au la bază faptul că între circuitele de comutaţie primară şi cele de comutaţie secundară există cuplaje inductive şi capacitive parazite determinate de poziţia reciprocă în spaţiu a acestora (depărtare, paralelism) precum şi de tensiunea primară şi de puterea de scurtcircuit. În desfăşurarea lor, fenomenele tranzitorii de comutaţie sînt însoţite de apariţia unor impulsuri de tensiune, ale căror vîrfuri pot ajunge la zeci de kV şi cu frecvenţe ale tensiunilor induse de ordinul megaherţilor.

Aceste fenomene tranzitorii, sau altfel numite *supratensiuni de comutaţie*, pot conduce la funcţionarea intempestivă a protecţiilor prin relee şi chiar la detriorarea circuitelor secundare şi de aceea sînt necesare măsuri de prevenire şi localizare a lor.

Traseele cablurilor circuitelor secundare se aleg cît mai judicios. Mai mult chiar, pentru limitarea unor eventuale efecte negative, în unele ţări, circuitele secundare pe teritoriul unei staţii de transformare sînt descentralizate, prin montarea mai multor baterii de acumulatoare.

Instalaţiile de legare la pămînt din staţiile de transformare se dimensionează astfel încît să asigure conducerea curenţilor de punere la pămînt, precum şi a curenţilor de înaltă frecvenţă datoraţi în special manevrelor de comutare.

Din calcule se determină dacă cablurile pentru circuitele secundare, trebuie ecranate. În acest caz, ecranele se leagă la capete, la pămînt.

În S.U.A. [7.15] se recomandă de asemenea, ca la nivelul de intrare a circuitelor secundare în panourile de protecţie, să se monteze condensatoare de scurtcircuitare la masă a undelor de înaltă frecvenţă.

7.3.4. Măsuri pentru controlul temperaturii contactelor electrice

Cel mai perfecţionat mod de urmărire a temperaturii contactelor se bazează pe folosirea aparatelor de măsurare a intensităţii radiaţiei infraroşii (bolometre). Cu ajutorul acestor aparate se poate determina temperatura unui contact, aflat la distanţe de pînă la 20—30 m, în domeniul de temperaturi 50—200°C. Aparatele simple sînt prevăzute cu un dispo-

v cu lunetă, cu ajutorul căruia se încadrează precis obiectivul respec-
, iar temperatura se citește din indicațiile unui milivoltmetru. Apa-
ele mai complexe folosesc camere de luat vederi, sensibile la radiațiile
'aroșii. Imaginile astfel obținute și reproduse pe ecran, scot în evi-
ță, prin nuanțe diferite, zonele, respectiv punctele cu temperaturi
i ridicate. Astfel sînt de exemplu echipamentele Thermovision, care
sistem de televiziune cu circuit închis, în alb-negru sau color. Spre
osebire de aparatele simple cu lunetă, care sînt portabile, echipamen-
e Thermovision se instalează pe autodube sau pe elicoptere pentru a
ea fi deplasate la fața locului.

In instalațiile interioare de medie și înaltă tensiune, pentru depis-
ea eventualelor contacte slabe se utilizează vopseaua sensibilă la tem-
aturi. Vopseaua cuprinde în compoziție o soluție AW2 în toluen și
pigment reversibil. Pigmentul reversibil se prepară în patru faze și
rinde $HgCl_2$, KI, $CuSO_4$ și $Na_2S_2O_3$. Vopseaua are o culoare roșie, care
temperatura de peste 75°C se modifică în albastru închis. Se vopsesc
țiuni ale contactelor electrice cu această vopsea și se depistează
n control vizual, dacă vopseaua și-a schimbat culoarea sau nu.

In instalațiile exterioare de medie și înaltă tensiune, pentru depistarea
ntualelor contacte slabe se utilizează dispozitive bimetalice sensibile
temperatură. Elementul se fixează la unul din șuruburile clemei de
raveghiat. Un asemenea dispozitiv este construit din două piese
. 7.36) una fixă (*1*), confecționată din cupru și cealaltă mobilă (*2*),
nfecționată din oțel. Aceste două părți sînt lipite între ele cu un aliaj (*5*)
a cărui compoziție intră : plumb, staniu, cadmiu și bismut.

Dacă clema depășește o temperatură de 110—120°C, ceea ce cores-
nde unei temperaturi de cca. 80°C la locul de îmbinare între cele două
tale, atunci aliajul (*5*) se topește și partea mobilă (*2*) a elementului
desprinde de partea fixă (*1*), rămînînd agățată într-un lănțișor (*3*)
ndicînd astfel existența unei supraîncălziri a clemei.

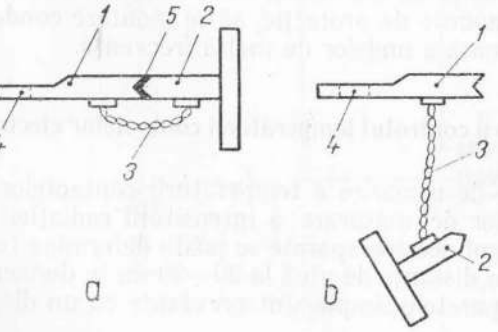


Fig. 7.36. Dispozitiv bimetalic sensibil la temperatură : *a* — în stare normală ; *b* — la depășirea temperaturii prescrise.

7.4. METODE DE LOCALIZARE ȘI PREVENIRE A AVARIERII TRANSFORMATOARELOR

Transformatoarele sînt elementele cele mai sensibile ale instalațiilor electrice, a căror avariere poate avea consecințe din cele mai grave. Aceste consecințe pot merge pînă la incendierea transformatorului și afectarea elementelor amplasate în apropiere.

7.4.1. Tipuri constructive de transformatoare

Constructiv transformatoarele s-au dezvoltat istoric, pornind de la transformatoarele uscate, la transformatoarele în ulei și pînă la transformatoarele izolate în rășini epoxidice sau în medii de gaze inerte.

Transformatoarele uscate, la care izolația între bobine sau între bobine și miezul magnetic se realiza prin aer, au fost repede părăsite, avînd în vedere pe de o parte fiabilitatea lor redusă, iar pe de altă parte faptul că nu se puteau realiza constructiv unități de puteri unitare mari, respectiv de tensiuni înalte.

Transformatoarele în ulei formează în prezent majoritatea transformatoarelor și practic totalitatea transformatoarelor de putere.

Transformatoarele izolate în rășini epoxidice sînt în general transformatoarele de măsură pînă la 110 kV inclusiv.

Transformatoarele de putere se protejează la supracurenți prin protecții sensibile la defecte în afara zonei transformatorului (protecții maximale de curent), în zona transformatorului (protecții maximale de curent și diferențiale) precum și la defecte în interiorul transformatorului (protecții diferențiale și de gaze).

La supratensiuni, transformatoarele se protejează prin descărcătoare.

Mărirea duratei de viață a transformatoarelor este esențială pentru transformatoare (vezi subcap. 5.4), motiv pentru care se iau măsuri pentru întîrzierea fenomenului de îmbătrînire a izolației.

7.4.2. Fenomenul de îmbătrînire a izolației solide și a uleiurilor electroizolante

Îmbătrînirea izolației din hîrtie sau preșpan este favorizată de o serie de factori din care cei mai importanți sînt temperatura și umiditatea.

Temperatura acționează asupra gradului de polimerizare a izolantului solid. Cercetările efectuate [7.16] au scos în evidență că la o temperatură de 90°C a izolației (valoare admisă de normele în vigoare), gradul de polimerizare a celulozei scade cu 20%, în timp de 3 ani. Dacă tempe-

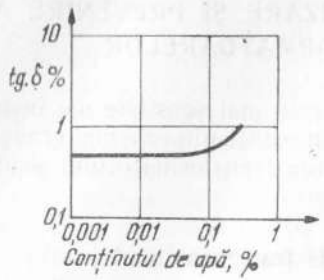


Fig. 7.37. Variația tg δ a izolației de hîrtie în funcție de conținutul de apă.

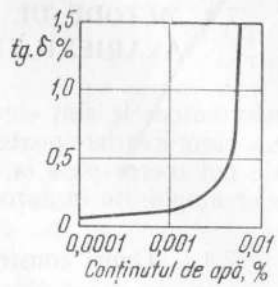


Fig. 7.38. Variația tg δ a uleiului electroizolant în funcție de conținutul de apă.

atura este de 95—96°C, atunci în aceiași durată de funcționare, gradul le polimerizare scade cu mai mult de 40%.

Umiditatea poate proveni din aerul atmosferic sau din conținutul de pă al uleiului. Ea modifică tangenta unghiului de pierderi dielectrice fig. 7.37). În plus, oxigenul conținut de apă este și mai dăunător pentru ă, în afară de aportul lui la îmbătrînirea izolației, atacă indirect și eluloza prin produsele de oxidare ale uleiului.

Îmbătrînirea uleiului electroizolant este favorizată de asemenea de serie de factori, din care cei mai importanți sînt umiditatea și oxigenul.

Umiditatea modifică tangenta unghiului de pierderi dielectrice fig. 7.38). În exploatare s-a demonstrat că numai urmărirea practică a tg δ ste insuficientă și că această probă trebuie corelată și cu gradul de aciitate și rigiditate dielectrică. Valorile recomandate la care devine necesară recondiționarea uleiului electroizolant sînt : tg δ la 90°C între 8—2%, gradul de aciditate între 0,5—1 mg KOH/gr și rigiditatea dielectrică între 70—90 kV/cm.

Asupra îmbătrînirii uleiului electroizolant mai acționează și alți factori, ca : lacurile dizolvate, substanțele polimerizate, particulele de praf provenind din izolație, precum și particulele metalice provenite în special din instalațiile de răcire.

7.4.3. Măsuri de prevenire a îmbătrînirii premature a izolației transformatoarelor

Pentru reducerea vitezei de degradare a izolației solide și a uleiului lectroizolant se iau două feluri de măsuri, care nu se exclud una pe cealtă : aditivarea uleiului și separarea uleiului de aerul atmosferic.

Aditivarea uleiului de transformatoare constă în tratarea uleiului cu inhibitori care reduc viteza de îmbătrînire a uleiului. Aceștia măresc stabilitatea la oxidare și micșorează coroziunea și capacitatea de absorbție a gazelor în prezența fenomenelor electrice. Inhibitorii sînt de trei feluri, după funcția pe care o îndeplinesc :

— antioxidanți, care acționează împotriva efectelor negative ale prezenței oxigenului în ulei ;

— pasivatori, care diminuează fenomenul de dizolvare a cuprului și fierului în ulei ;

— dezactivatori, care diminuează acțiunea cuprului și fierului, dizolvat în ulei.

Acești inhibitori se completează reciproc și în procesul de activare a uleiului se utilizează toate cele trei feluri.

Separarea uleiului din transformator față de contactul cu aerul atmosferic se poate realiza constructiv, fie prin introducerea unui element de absorbție sau de oprire a pătrunderii umezelii în ulei, fie prin etanșarea completă a uleiului în raport cu aerul atmosferic. Pentru aceasta se folosesc diverse procedee constructive.

Filtrul de aer cu silicagel (fig. 7.39) are rolul de a intercala în circuitul aerului care intră sau iese din transformator o substanță absorbantă a umidității.

Această substanță este silicagelul, care în stare umedă își schimbă culoarea. Culoarea silicagelului se poate constata prin vizorul *1*, silicagelul fiind depozitat în recipientul *2*. În filtru se introduce prin bușonul *3* și o cantitate redusă de ulei în recipientul *4*. Contactul cu aerul din transformator, se realizează prin intercalarea acestui filtru între aerul atmosferic și perna de aer din conservatorul transformatorului.

Filtrul cu termosifon reprezintă o variantă îmbunătățită a filtrului cu silicagel și se deosebește de filtrul de aer prin faptul că silicagelul este introdus direct în circuitul de ulei (fig. 7.40). Între cuva *1* a transformatorului și conservatorul *2* se intercalează filtrul cu silicagel *3*.

Transformatoarele etanșe, reprezintă soluția cea mai simplă de evitare a contactului direct aer-ulei. Volumul pernei de aer, care rămîne închis în cuva transformatorului, trebuie să asigure dilatarea uleiului, iar cuva se construiește pentru a rezista la suprapresiunea interioară.

Un alt sistem de etanșare a uleiului față de aer îl reprezintă *separarea uleiului de aer*, fie printr-o membrană elastică, fixată în conservatorul transformatorului, fie printr-un burduf (*1*), care separă uleiul din transformatorul *2* de uleiul din conservatorul *3* (fig. 7.41).

În ultima vreme s-au introdus din ce în ce mai frecvent transformatoare avînd *rezervoare elastice și pernă de azot* (fig. 7.42). Uleiul din trans-

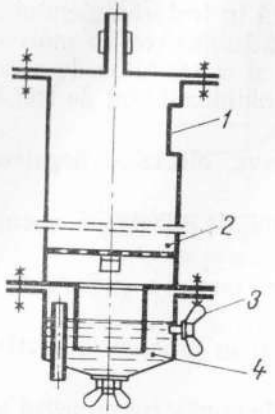


Fig. 7.39. Filtrul de aer cu silicagel.

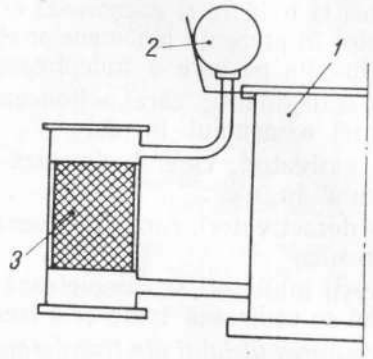


Fig. 7.40. Filtrul cu silicagel și termosifon.

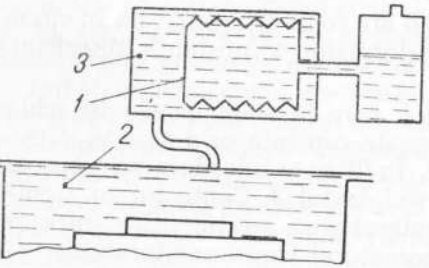
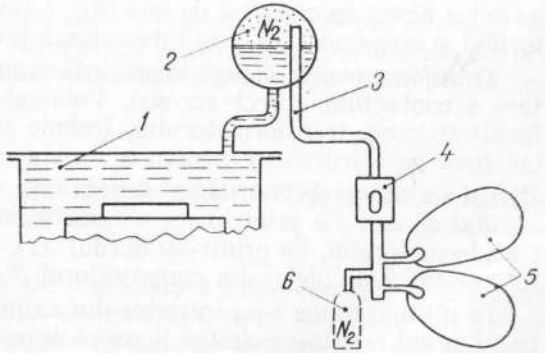


Fig. 7.41. Conservator cu burduf.

. 7.42. Transformator sub
t cu rezervoare elastice.



formatorul *1* este în comunicație cu cel din conservatorul *2*. Cu ajutorul unei conducte *3* și al unui filtru *4*, spațiul superior al conservatorului este menținut sub azot, care umple și compensatoarele elastice *5*. Aceste compensatoare preiau volumul de azot prin dilatare sau contractare dînd astfel posibilitatea de dilatare sau contractare a uleiului din transformator. Completarea cu azot, se poate face de la o butelie *6*.

În afara acestor metode principale de separare a uleiului de transformator de aerul atmosferic mai există o serie de metode derivate însă tot din cele indicate mai sus (conservatoare multiple, conservatoare compartimentate, ș.a).

7.4.4. Măsuri de limitare a efectelor unei eventuale incendieri de transformator

Pentru evitarea incendierii transformatoarelor se iau măsuri de introducere a protecțiilor rapide prin relee (gaze și diferențială). Totodată sub transformator se construiesc cuve umplute cu piatră pentru eventuala colectare a uleiului scurs.

Pentru limitarea efectelor unei eventuale incendieri se iau două genuri de măsuri. Prima se referă la separarea transformatoarelor prin ziduri despărțitoare antifoc de alte construcții sau instalații. Aceștia se execută pentru unitățile mari și pentru transformatoarele montate în exterior [7.17]. A doua se referă la înconjurarea transformatorului cu o instalație fixă de stins incendiu. La declanșarea unui eventual incendiu în zona transformatorului se dă co nanda automată de pornire a instalației de stins incendiu de către sesizoarele de temperatură. Apa este azvîrlită asupra transformatorului din toate direcțiile, sub forma unei pînze fine, care reușește în general să localizeze începutul de incendiu [7.18].

7.5. METODE MODERNE DE LOCALIZARE ȘI PREVENIRE A AVARIERII GENERATOARELOR

În afara fenomenelor electrice legate de stabilitatea statică și dinamică a înfășurărilor și de regimul electric de durată, caracteristice pentru generatoarele electrice sînt sistemele de răcire precum și vibrațiile și zgomotele produse în timpul funcționării.

7.5.1. Sisteme de răcire a generatoarelor

Turbogeneratoarele de mare și foarte mare putere utilizează drept ediu de răcire apa sau hidrogenul.

Gradul de puritate al hidrogenului are un efect considerabil asupra unei funcționări a generatorului. Amestecul hidrogenului cu aerul prentă pericol de explozie cînd hidrogenul din amestec este cuprins între % și 76%. Din acest motiv în corpul generatorului se menține întotauna o suprapresiune de hidrogen [7.19].

În tabelul 7.4 se redau sistemele de răcire practicate la diferite grupuri.

Tabelul 7.4

Diverse sisteme de răcire aplicate la turbogeneratoare

Firma constructoare	Tensiune kV	Putere MW	Agent de răcire			Suprapresiunea hidrogenului 10^5 Pa
			Înfăș. rotorică	Înfăș. statorică	Miez statoric	
EMZ (U.R.S.S.)	15,75	200	H	H	H	8
ıbelectrotiajmaș	20	300	H_2O	ulei	ulei	
lectrotiajmaș (U.R.S.S.)	20	500	H_2O	H_2O	H	
M.G.B. (R.S.R.)	24	330	H	H_2O	H	4
emens	21	340	H	H	H	4
EG	21	638	H	H_2O		4
BC	26	1 130	H	H_2O	H	4,22
BC	27	1 530	H	H	H	4

Suprapresiunea hidrogenului se urmărește cu manometre sensibile u contacte de semnalizare optică și acustică, care transmit semnalele n camera de comandă a centralei.

Puritatea hidrogenului se urmărește prin determinarea conținutului e oxigen, cu ajutorul aparatului Orsat. Limita inferioară admisibilă a urității hidrogenului se consideră ca fiind amestecul format din 92—93% idrogen, 2% oxigen și restul fiind alte gaze. În mod normal conținutul e hidrogen trebuie să fie de 96—98%.

Verificarea etanșeității instalațiilor de răcire cu hidrogen se execută tît la punerea în funcțiune cît și la reparații, cu care ocazie se execută rmătoarele probe:

— proba hidraulică a răcitoarelor de hidrogen;

— proba pneumatică a statorului generatorului, cu rotorul demontat;

— proba pneumatică a rotorului, a vasului de separație ulei — hidroen, a uscătorului de hidrogen, a agregatului de ulei de etanșare a conuctelor de hidrogen și bioxid de carbon și a rampelor de alimentare:

— proba de presiune a circuitului de răcire cu apă al generatorului;

— proba de presiune la rece a conductelor exterioare de apă distilată pentru răcirea înfășurărilor;

— proba pneumatică a barelor ecranate etanșe de racordare a generatorului.

Probele de mai sus sînt funcție și de tipul sistemului de răcire al generatorului.

Foarte importantă este operația de evacuare rapidă a hidrogenului din circuitul de răcire, necesară, fie la oprirea generatorului pentru revizie sau reparație, fie în caz de pericol de incendiu în zona generatorului. În ambele cazuri evacuarea se execută prin intermediul bioxidului de carbon, care are rol de tampon între hidrogen și aer. Cu toate măsurile de precauție luate, totuși au fost cazuri de avarieri ale turbogeneratoarelor și chiar ale transformatoarelor bloc, datorate instalațiilor de răcire cu hidrogen.

Exemplul 7.3. Astfel, un turbogenerator de 200 MVA a fost avariat ca urmare a unei explozii produse în zona tuburilor de ecranare a bornelor generatorului, urmată de un început de incendiu exterior generatorului. Avaria s-a produs din cauza unei neetanșeități între bornele generatorului și carcasa acestuia, hidrogenul pătrunzînd în tubulatura de ecranare a barelor. Explozia s-a datorat unei scîntei apărute în tubulatura de ecranare. Scînteia a apărut probabil din cauza efluviilor create de cîmpul electric existent între bara colectoare și capetele metalice ale izolatoarelor de centrare ale acestor bare, în interiorul tubulaturii.

Exemplul 7.4. Un generator de 214 MVA, conectat prin bare ecranate la transformatorul bloc, amplasat în exteriorul sălii mașinilor, a fost avariat în timpul operației de oprire, prin explozia și aprinderea amestecului de hidrogen cu aerul. Generatorul trebuia oprit pentru scurt timp. Din cauza unei manevre greșite, s-a evacuat hidrogenul înainte de oprire, țeava de evacuare în atmosferă fiind amplasată deasupra transformatorului bloc. În prezența efluviilor, datorate fenomenului corona, hidrogenul în amestec cu aerul a explodat și s-a aprins. Ca urmare s-au conturnat izolatoarele transformatorului și s-a produs scurtcircuit la borne [7.20].

Exemplul 7.5. La un generator de 180 MVA, în timpul funcționării s-a produs o explozie la inelele de contact de pe arbore. Avaria a apărut ca urmare a unor garnituri necorespunzătoare existente în zona inelelor de contact, unde există numeroase scîntei date de periile colectoare [7.21].

Exemplul 7.6. Un alt defect de etanșare la arbore a produs o gravă avariere a unui turbogenerator de 500 MW. Explozia și incendiul produs au condus la aprinderea statorului, deformarea puternică a arborelui rotorului și avarierea excitatricei [7.22].

7.5.2. Vibrații și zgomote

Vibrațiile și zgomotele unui generator au la bază fenomene electrice și mecanice.

Vibrațiile sînt caracterizate prin deplasarea lineară în mm, viteza de vibrație în mm/s, accelerația de vibrație în mm/s² și frecvența

brației în per/s. Deplasarea liniară produsă de vibrație dă informații ivind jocurile mașinii, gradul de elasticitate al subansamblurilor și sechilibrele remanente ale rotoarelor. Viteza de vibrație reprezintă nomenul fizic de care depinde zgomotul mașinii. Accelerația de vibrație i informații asupra nivelului forțelor care solicită materialul.

Nivelul limită admisibil al vibrațiilor lagărelor turbogeneratoarelor hidroagregatelor sînt normate în R.S.R. [7.23 și 7.24] prin valorile abilite pentru deplasarea liniară (amplitudinea dublă a vibrației). ceasta este cuprinsă între 0,013 și 0,04 mm. În U.R.S.S., prin OST 533-68 se acceptă de asemenea ca limită maximă admisibilă 04 mm.

Zgomotele sînt caracterizate prin presiunile acustice la anumite dis-nțe, spectrul frecvenței și factorul de directivitate.

Nivelurile limită admisibile ale presiunii acustice, în dB, pentru ntralele electrice sînt stabilite [7.25] prin norme republicane de protecție muncii.

Acestea sînt :

— curbe de zgomot 85 dB, în sălile mașinilor, cazanelor, stațiilor epurare chimică, stații de pompe și compresoare și gospodării de mbustibil ;

— curbe de zgomot 75 dB, în camerele de comandă termice și în boratoarele tehnologice ;

— curbe de zgomot 65 dB, în camerele de comandă electrice ;

— curbe de zgomot 55 dB, în birourile tehnice și administrative.

Măsurările se execută pentru vibrații cu un aparat de măsurare a brațiilor, unul din tipuri fiind SM-241 fabricat RFT, prevăzut cu tra-uctoare iar zgomotele se măsoară cu sonometrul.

Principalele măsuri care se iau pentru evitarea depășirii limitelor lmise sînt de concepție și proiectare (izolări fonice, atenuatoare de gomote, amortizarea vibrațiilor) precum și de exploatare și reparare măsurări periodice și echilibrări ale rotoarelor).

7.5.3. Urmărirea degradării izolației prin metoda fizico-chimică

În procesul de degradare a izolației unui turbogenerator se formează bstanțe caracteristice, compuse din oxizi de carbon și hidrocarburi soare. Aceste substanțe se difuzează prin izolație și se regăsesc în hidro-enul de răcire în proporții diferite, funcție de natura și intensitatea gradării [7.26].

Analiza cantitativă și calitativă a mostrelor preluate din gazul de cire se face periodic și se execută prin cromatografie în faza gazoasă spectrometrie de masă [7.27].

7.6. ORGANIZAREA INTERVENȚIILOR ÎN REȚELELE ELECTRICE

Modul de organizare a echipelor de intervenție se încadrează în principiu în sistemul general organizatoric stabilit pentru exploatarea și repararea rețelelor electrice.

În R.S.R. fiecare întreprindere de rețele electrice își desfășoară activitatea pe două sau trei județe administrative. Pentru exploatarea și repararea rețelelor electrice din aceste teritorii sînt organizate [7.5] :

— o secție de rețele de înaltă tensiune, la nivelul fiecărei întreprinderi, care se ocupă cu exploatarea și repararea rețelelor de 110—400 kV ;

— secții județene de distribuție a energiei electrice, care se ocupă cu exploatarea și repararea rețelelor de 0,4—20 kV, de pe teritoriul județelor respective ;

— centre de rețele electrice (de înaltă tensiune sau de distribuție a energiei electrice), ca subunități administrative ale secțiilor, avînd un teritoriu de acțiune bine delimitat și sediul într-una din localitățile mai importante din județ.

Echipele de localizare și remediere a incidentelor și deranjamentelor se organizează, în principiu, la nivelul fiecărui centru de rețele electrice și acoperă, funcție de importanța instalațiilor și consumatorilor, una, două sau trei ture pe parcursul unei zile.

Pentru ca localizarea și remedierea incidentelor și deranjamentelor să se poată efectua cît mai rapid posibil, trebuie să existe o organizare și o dotare tehnică corespunzătoare, din care nu trebuie să lipsească următoarele :

— un loc fix, cunoscut și de abonați, unde se pot aduce la cunoștință direct sau telefonic, evenimentele care apar ;

— un sistem de preluare a reclamațiilor prin personal în tură sau automatizare ;

— un sistem de organizare a echipelor de localizare și remediere a evenimentelor nedorite ;

— o sferă de activitate bine delimitată pentru fiecare echipă și o coordonare în caz de necesitate a mai multor echipe ;

— un regulament sau o instrucțiune cu atribuții și sarcini de serviciu ale echipelor de intervenție ;

— o dotație tehnică corespunzătoare a echipelor de localizare și remediere a evenimentelor nedorite ;

— un sistem de legătură între echipele de intervenție și centrul coordonator al acestor echipe.

7.6.1. Locul de anunțare a incidentelor sau deranjamentelor

În general apariția unei avarii sau deranjament poate fi sesizată de:
— dispecerul sau coordonatorul de manevre de serviciu, pentru stalațiile de medie și înaltă tensiune, prin informațiile primite de la stalațiile de telemecanică sau telesemnalizare;
— personalul de exploatare al stațiilor de transformare pentru elemenle stației respective, sau în cazul cînd la această stație sînt concentrate instalațiile de telemecanică sau telesemnalizare ale stațiilor vecine și entru aceste stații;
— abonații pentru instalațiile de medie și de joasă tensiune care-i imentează.
În toate cazurile este definit un loc fix unde se anunță toate aceste nomene nedorite, cunoscut atît de personalul de exploatare cît și de ɔonați.

7.6.2. Sisteme de preluare a anunțurilor

Sistemele de preluare a anunțurilor pot fi:
— directe, în cazul cînd personalul de tură, preia direct sau telefonic esizarea respectivă;
— pe bandă de magnetofon, în cazul cînd nu există o persoană permanentă la locul de anunțare, caz în care la apelul telefonic banda magetofonului intră în funcțiune, anunță abonatul că acesta are la dispoziție n minut pentru comunicarea datelor necesare, înregistrarea făcîndu-se e bandă și apoi aparatul trece automat pe înregistrare, preluînd datele nunțate de abonat.
La reîntoarcerea echipei, aceasta derulează banda, ascultă mesajul ıregistrat și trece la acțiune.

7.6.3. Sisteme de organizare a echipelor de intervenție

Sistemele de organizare a echipelor de localizare și remediere a incientelor și deranjamentelor sînt diferite, în principal după importanța ɔnsumatorilor.
În componența maximă a unei ture a cărei atribuție este localizarea remedierea incidentelor și deranjamentelor intră următorul personal:
— un coordonator al echipelor de intervenție, care are sarcina prinpală de a dispune deplasarea în teren a echipelor de intervenție și a le ɔordona în acțiune;
— un telefonist, care preia anunțurile abonaților, le înregistrează le transmite coordonatorului în cazuri mai dificile sau direct echipelor

de intervenție, în cazuri simple (în multe cazuri funcția de telefonist este preluată direct de coordonator);
— echipele de intervenție care se deplasează în teren pentru localizarea și remedierea incidentelor sau deranjamentelor.
Echipele de intervenție diferă atît din punctul de vedere al specializării lor (de înaltă tensiune sau de distribuție), cît și după modul cum acoperă cele 24 h ale zilei (în una, două, trei ture sau echipe consemnate la domiciliu, care intervin numai la solicitare specială).
Echipele permanente care acoperă o parte sau în totalitate cele 24 h ale zilei, se compun în principal, dintr-un șef de echipă, un șofer și un electrician (șeful de echipă sau electricianul poate fi și șofer).
Echipele de intervenție sau de reparații consemnate la domiciliu sînt formate din personal, care în ore'e libere poate fi găsit telefonic la domiciliu.

7.6.4. Sfera de activitate a echipelor de intervenție

Sfera de activitate a echipelor de intervenție este diferită, funcție de tensiunea rețelelor electrice și după teritoriul în care acționează acestea.
După tensiunea de funcționare a rețelelor electrice se formează în general, două categorii de echipe: una pentru instalațiile de înaltă tensiune și alta pentru instalațiile de medie și joasă tensiune.
După teritoriul în care acționează echipele de intervenție, acestea pot fi pentru un teritoriu mai larg, avînd o rază de acțiune de cca 30—40 km (cazul echipelor de intervenție pentru înaltă tensiune, sau cele pentru distribuție din mediul rural) sau pentru un teritoriu limitat la un oraș, un municipiu sau sectoare dintr-un municipiu.

7.6.5. Dotarea tehnică a echipelor de intervenție

Dotarea tehnică a echipelor de intervenție cuprind în principal mijloace de telecomunicație cu abonații și cu echipele de intervenție; instrucțiuni asupra modului de acționare, formulare de lucru, mașini, scule, dispozitive de lucru, instrumente și materiale specifice pentru intervenție.
Mijloacele de telecomunicație sînt în principal, telefonul pentru relația abonat-coordonator și aparate de emisie de recepție pentru relația coordonator-echipe de intervenție. Abonații anunță telefonic sesizările pe care le au, iar coordonatorul anunță echipele de intervenție care se află pe traseu prin sistemul de radio emisie-recepție.
Sistemul de radio emisie-recepție, cuprinde:
— o instalație de emisie-recepție fixă montată la coordonator;

— instalații de emisie-recepție mobile, montate pe fiecare mașină e intervenție, prin care se ține legătura cu centrul coordonator sau între chipe ;

— instalații de emisie-recepție portabile, aflate asupra fiecărui membru echipei, prin care în caz de necesitate membrul echipei respective ține gătura permanentă cu ceilalți participanți.

Aparatele de emisie-recepție fixe și mobile au mai multe frecvențe e lucru comutabile, iar cele portabile lucrează pe o singură frecvență.

În fig. 7.43 se prezintă modul de organizare a unei rețele de radiomisie-recepție pe teritoriul unui județ administrativ. Dispecerul județean *M*) ține legătura cu centrele de distribuție (*CD*) și cu centrul de transport *CT*). El are posibilitatea de a intra în relații și cu personalul stațiilor e transformare (*ST*), ca și cu mașinile de intervenție în rețelele pentru ransportul (*I*), sau pentru distribuția (*i*) a energiei electrice. În mod ormal acestea din urmă țin legătura cu centrul de transport (CT), respeciv cu centrele de distribuție (*CD*) de care aparțin. Din cauza reliefului, n unele cazuri legătura nu poate fi obținută în anumite zone (*Z*) numite one de umbră.

Instrucțiunile de serviciu cuprind în principal modul de acționare n anumite cazuri și atribuțiile de serviciu ale fiecărui participant.

Un exemplu cu privire la modul de acționare pentru identificarea ocului defect, pe o linie electrică aeriană de înaltă tensiune, pe baza nstrucțiunilor de serviciu a fost descris la punctul 7.1.2 :

Formularele de lucru cuprind autorizațiile de lucru pe baza cărora acționează echipele, pentru fiecare caz în parte și formularele de ridicare

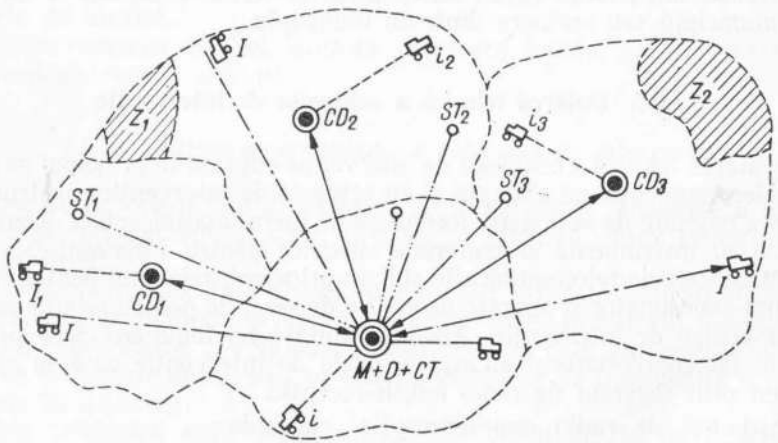


Fig. 7.43. Organizarea rețelei de radiocomunicații pe teritoriul unui județ.

a deranjamentelor unde se înscriu toate datele necesare pornind de la numele și prenumele, adresa reclamantului pînă la constatările efectuate și ora la care a fost remediat deranjamentul.

Dotarea cu mașini, scule, dispozitive de lucru, instrumente și materiale specifice pentru intervenție prezintă o mare importanță, deoarece o dotare bogată este costisitoare și inutilă la un moment dat, iar o dotare săracă nu realizează scopul dorit.

Între aceste două limite trebuie găsit un optimum, între ceea ce se va depozita la centru și ceea ce va avea asupra ei mașina de intervenție.

La centrul de rețele trebuie să se afle în principal materialele grele, care pot fi transportate numai cu utilaje speciale (de ex. stîlpi, transformatoare, ș.a), iar în auto specială materiale ușoare, cu care se pot efectua intervenții de moment (de ex. bucăți de conductoare, cleme, armături, siguranțe, ș.a), cu care se poate reface alimentarea cu energie electrică, urmînd ca în cazuri mai deosebite reparația integrală să fie efectuată la prima posibilitate.

Ca instrumente de măsurare, nu trebuie să lipsească megohmmetrele, voltmetrele, indicatoarele de tensiune sau de sens, clește — ampermetru ș.a., urmînd ca defecțiunile mai grave, de ex. cele în cable subterane să fie depistate și localizate de echipe speciale, dotate în acest scop.

Sub aspectul sculelor și dispozitivelor de lucru, echipele de intervenție sînt dotate cu elementele necesare realizări atribuțiilor lor.

Se dau cîteva exemple de mașini auto speciale dotate cu cele necesare pentru intervenții [7.28].

Pentru intervențiile în rețelele de distribuție din mediul urban, în special pentru abonații casnici, se utilizează mașina Dacia 1 300 — Combi (fig. 7.44).

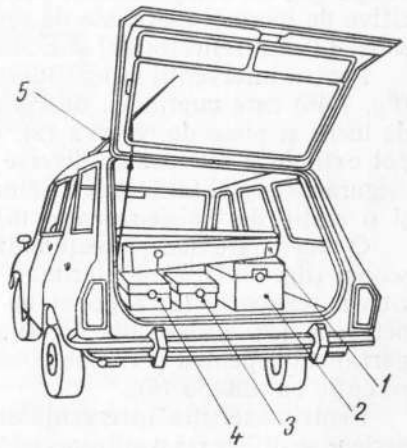


Fig. 7.44. Autospecială pentru intervenție montată pe autoturism Dacia 1300 - Combi.

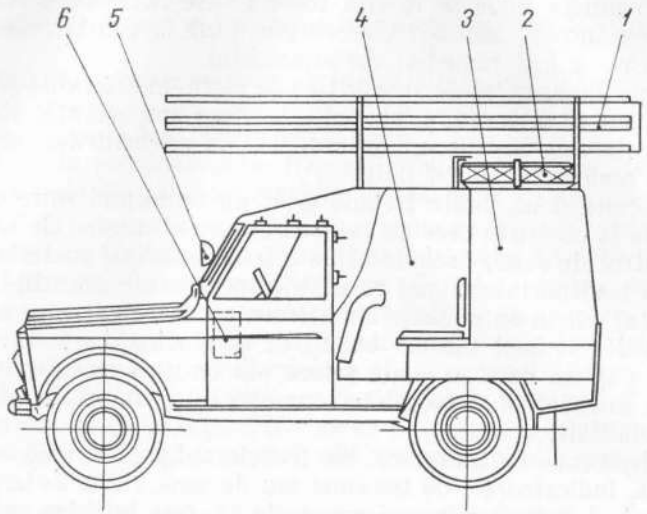


Fig. 7.45. Autospecială pentru intervenţii montată pe autoturism ARO-240.

Maşina este dotată cu o trusă cu scurtcircuitoare mobile (*1*), o ladă u scule (*2*), o ladă cu instrumente de măsurare (*3*), o ladă cu piese de chimb (*4*) şi cu un aparat de emisie-recepţie cu antenă (*5*).

Maşina de intervenţie poate fi utilată şi pe un autoturism ARO-240 ig. 7.45), care conţine : o scară extensibilă (*1*), o ladă cu scule de interenţie (*2*), un compartiment pentru aparate de măsurare, scule şi dispoitive de lucru şi materiale de rezervă (*3*), un compartiment pentru peronal (*4*), un reflector (*5*) şi o staţie de emisie-recepţie (*6*).

Pentru intervenţii la înălţime se utilizează autospeciale tip TV-12 DC ig. 7.46) care cuprinde : un compartiment pentru scule (*1*), dispozitive e lucru şi piese de rezervă (*2*), o scară mecanică (*3*) cu elemente ce se ot extinde şi roti pentru diverse poziţii, dispozitive de calare (*4*) pentru sigurarea stabilităţii maşinii cînd se lucrează pe scară, un reflector (*5*) o staţie de emisie-recepţie (*6*).

O amenajare mai perfecţionată pentru lucru la înălţime este autotelecopul (fig. 7.47), care cuprinde : maşina propriu-zisă SR-113 (*1*), dispoitivul telescopic (*2*) acţionat de motorul maşinii, o nacelă pentru două ersoane (*3*), dispozitive de calare a maşinii pentru lucru (*4*), comartimentul pentru persoane şi scule de lucru (*5*) şi un aparat de emisieecepţie cu antenă (*6*).

Pentru execuţia intervenţiilor ca şi a reparaţiilor la liniile electrice eriene se utilizează o autospecială montată pe şasiul unui auto TVD-12 C

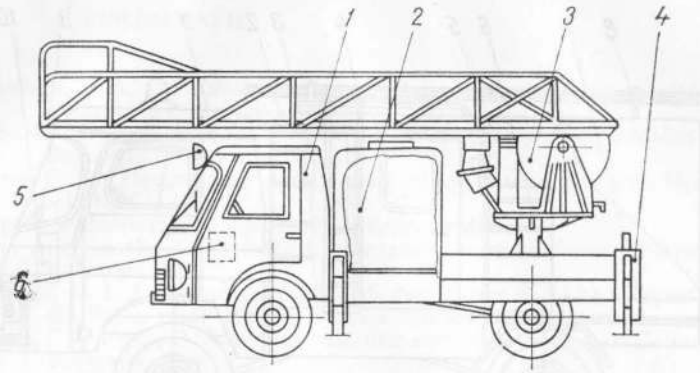


Fig. 7.46. Autospecială pentru intervenţii şi lucru la înălţime, cu scară mecanică, montată pe maşină TV-12 DC.

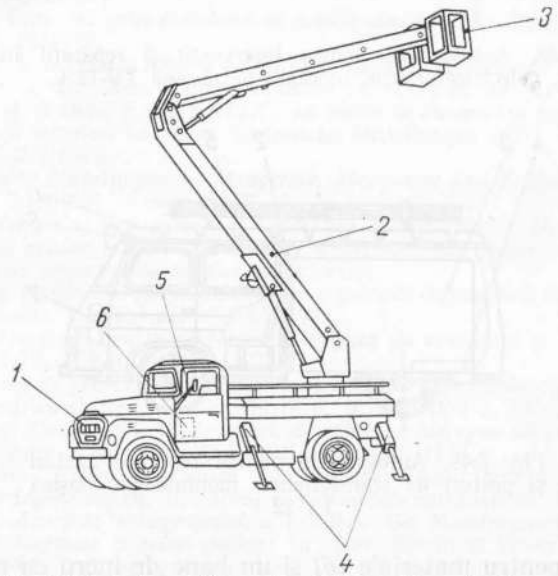


Fig. 7.47. Autospecială pentru intervenţii pentru lucru la înălţime, cu telescop, montată pe maşină SR-113.

(fig. 7.48) şi care cuprinde : cabina pentru şofer (*1*), compartiment pentru echipă şi scule (*2*) care are în interior rasteluri pentru scule şi dispozitive de lucru (*3*), precum şi bănci pentru personal iar la exterior o scară fixă (*4*), un compartiment cu prelată (*5*) în interiorul căruia se

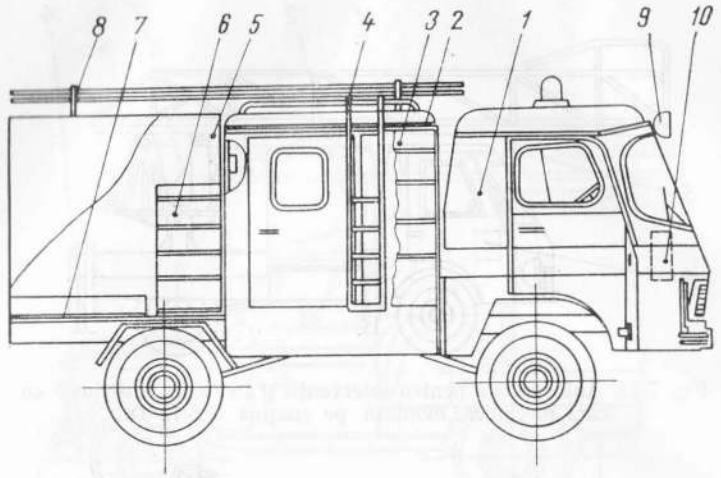


Fig. 7.48. Autospecială pentru intervenţii şi reparaţii în linii electrice aeriene, montată pe maşină TV-12 C.

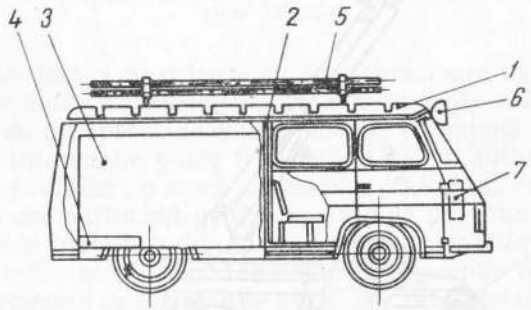


Fig. 7.49. Autospecială pentru reparaţii cabluri şi posturi de transformare, montată pe maşină TV-12 F.

află dulapuri pentru materiale (*6*) şi un banc de lucru cu menghină (*7*), o scară extensibilă (*8*), un reflector (*9*) şi o staţie de emisie-recepţie (*10*).

Pentru execuţia reviziilor şi reparaţiilor la posturi de transformare se utilizează autospeciale montate pe maşina TVD-12 F (fig. 7.49) care cuprinde o reîmpărţire a caroseriei în compartiment pentru echipă (*1*), compartiment în care sînt organizate stelaje pentru materiale (*2*) şi aparate de măsurare (*3*), un banc de lucru cu menghină (*4*), o scară extensibilă (*5*), un reflector (*6*) şi o staţie de emisie recepţie cu antenă (*7*).

8. MĂSURI PENTRU LIMITAREA EFECTELOR AVARIILOR

8.1. ALEGEREA CORESPUNZĂTOARE A SCHEMELOR

În limitarea efectelor avariilor o importanţă deosebită o reprezintă schemele de alimentare cu energie electrică adoptate.

8.1.1. Clase de consumatori, niveluri de rezervare şi categorii de receptoare de energie electrică

În funcţie de puterea maximă absorbită sînt normate [8.1] patru clase de consumatori de energie electrică şi trei nivcluri de rezervare (tabelul 8.1).

Tabelul 8.1

Clase de consumatori şi niveluri de rezervare

Nivel de rezervare	Consumul asigurat în caz de întrerupere simplă	Durata de nealimentare				Observaţii
		Clasa A peste 50 MVA	Clasa B între 7,5–50 MVA	Clasa C între 2,5–7,5 MVA	Clasa D sub 2,5 MVA	
1	Integral	3 s	3 s	3 s	3 s	Durata de funcţionare a automaticii de sistem
2	Integral	30 min	30 min	2 h	2–8 h	Durata necesară pentru efectuarea manevrelor de izolare a defectului şi realimentare pe calea de rezervă.
3	Nimic	Se va stabili de la caz la caz în funcţie de condiţiile locale şi de structura schemei de alimentare.				

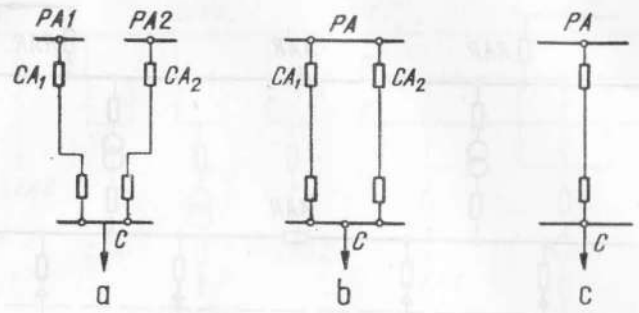


Fig. 8.1. Tipuri de scheme de alimentare:
a – cu căi de alimentare independente din puncte de alimentare independente; *b* – cu căi de alimentare independente din acelaşi punct de alimentare; *c* – cu o singură cale de alimentare.

Nivelul 1 de rezervare asigură căi de rezervare de 100%, pe căi de alimentare independente. În fig. 8.1, *a*, căile de alimentare independente se asigură din punctele de alimentare distincte (PA_1) şi (PA_2).

Nivelul 2 de rezervare asigură căi de rezervare de 100%, pe căi de alimentare independente, dar din acelaşi punct de alimentare (PA) aşa cum este reprezentat în fig. 8.1, *b*.

Nivelul 3 de rezervare asigură o singură cale de alimentare (fig. 8.1, *c*).

În instalaţiile consumatorilor pot exista patru categorii de receptoare, în funcţie de natura efectelor produse de întreruperea în alimentarea cu energie electrică:

— categoria zero (specială), la care întreruperea alimentării poate cauza explozii, incendii, distrugeri de utilaje sau pierderi de vieţi omeneşti;

— categoria I, la care întreruperea alimentării poate produce dereglarea proceselor tehnologice cu flux continuu, necesitînd perioade lungi pentru reluarea activităţii la parametrii cantitativi şi calitativi existenţi în momentul întreruperii sau rebuturi importante de materii prime, materiale, semifabricate, ş.a.;

— categoria a II-a, la care întreruperea alimentării are ca efect nerealizări de producţie, practic numai pe durata întreruperii;

— categoria a III-a, care cuprinde receptoarele care nu se încadrează în nici una din categoriile precedente.

Receptoarele de categoria zero sînt prevăzute cu căi de alimentare independente şi cu surse locale de intervenţie. Receptoarele de acest

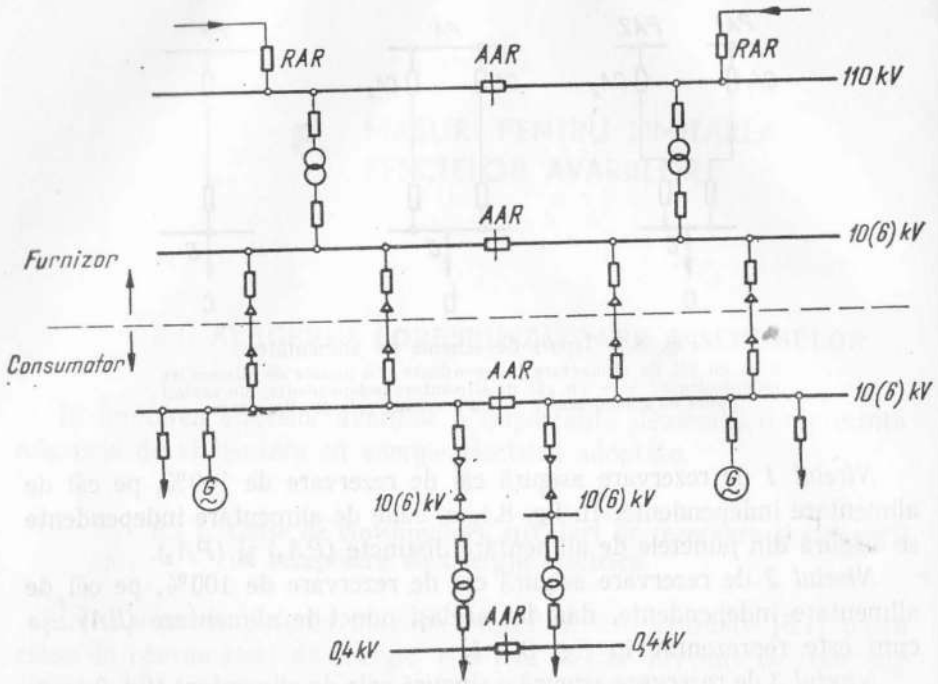


Fig. 8.2. Schema de alimentare a unui consumator cu receptoare de categoria zero.

gen au alimentări duble. Un exemplu de astfel de schemă de alimentare este indicat în fig. 8.2.

Receptoarele de categoria I dispun de două căi de alimentare independente, racordate în puncte de alimentare distincte.

Pentru alimentarea receptoarelor de categoria a II-a se adoptă una sau două căi de alimentare, funcție de importanța receptoarelor și de rapiditatea de intervenție.

8.1.2. Tipuri de scheme ale stațiilor de transformare și de conexiune

Schemele stațiilor de transformare și de conexiune se stabilesc funcție de gradul de siguranță și de economicitate dorit. Se utilizează două tipuri : cu bare colectoare paralele sau cu bare colectoare poligonale.

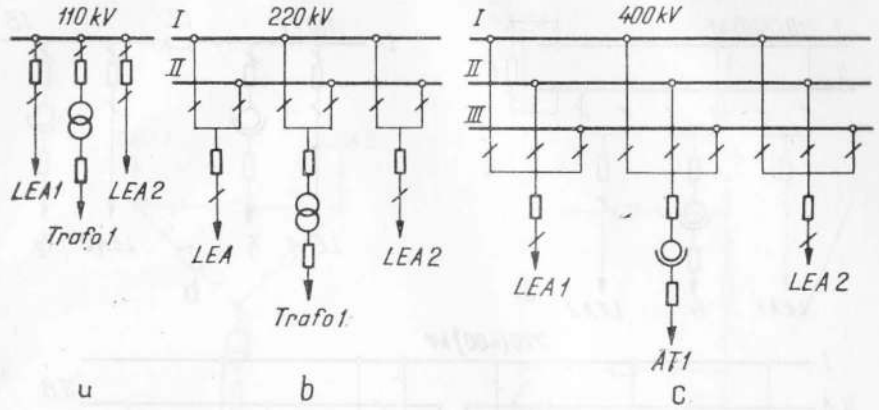


Fig. 8.3. Tipuri de scheme ale stațiilor de transformare și de conexiune : *a* — cu bară colectoare simplă ; *b* — cu bare colectoare duble ; *c* — cu bare colectoare triple.

Schemele stațiilor de transformare și de conexiune cu bare colectoare paralele pot avea : bară colectoare simplă (fig. 8.3, *a*) bare colectoare duble (fig. 8.3, *b*) și bare colectoare triple (fig. 8.3, *c*). Funcțional, schemele cele mai elastice sînt cele ale stațiilor cu bare colectoare triple dar, din motive de economicitate și ca urmare a creșterii gradului de fiabilitate al echipamentului electric, cele mai utilizate tipuri sînt stațiile cu bare colectoare duble și simple.

În funcție de tipul cuplelor, schemele stațiilor de transformare și de conexiune pot cuprinde : cuplă transversală (C.T.) (fig. 8.4, *a*), cuplă (C.L.) longitudinală (fig. 8.4, *b*) sau cuplă (C.L.T.) longo-transversală (fig. 8.4, *c*).

Un caz particular al schemelor stațiilor cu bare colectoare paralele îl reprezintă schemele cu bare colectoare și cuplă de transfer (C. Tr.) care se pot aplica și la scheme cu bare colectoare simple (fig. 8.5, *a*) și la scheme cu bare colectoare multiple (fig. 8.5, *b*).

Schemele stațiilor de transformare și de conexiune cu bare colectoare poligonale au derivat din cele cu bare colectoare paralele, în scopul micșorării numărului de echipamente. În aceste scheme întreruptoarele se rezervează reciproc, nemaifiind necesare cuplele. Cele mai frecvente scheme utilizate sînt cele în triunghi (fig. 8.6, *a*) și cele în patrat (fig. 8.6, *b*). Ele sînt în funcție de numărul de plecări și de transformatoare de putere care intră în schema stației.

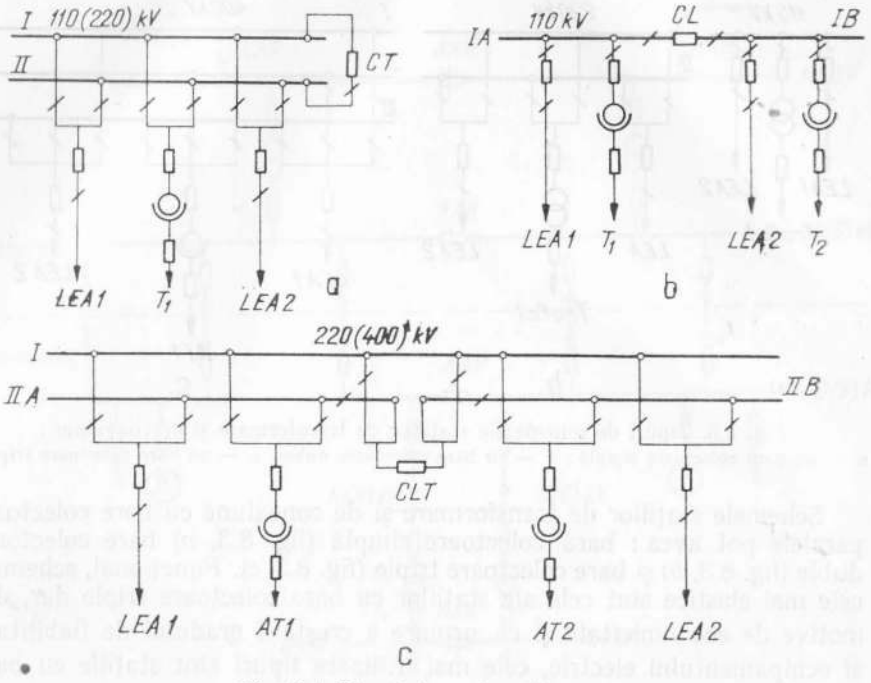


Fig. 8.4. Tipuri de cuple utilizate:
— cupla (CT) transversală; *b* — cupla (CL) longitudinală; *c* — cupla (CLT) longotransversală.

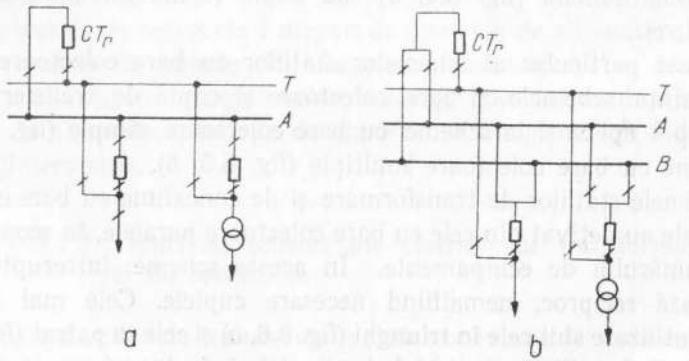


Fig. 8.5. Schemă cu bară și cuplă de transfer (CTr):
a — la bară colectoare simplă; *b* — la bară colectoare dublă.

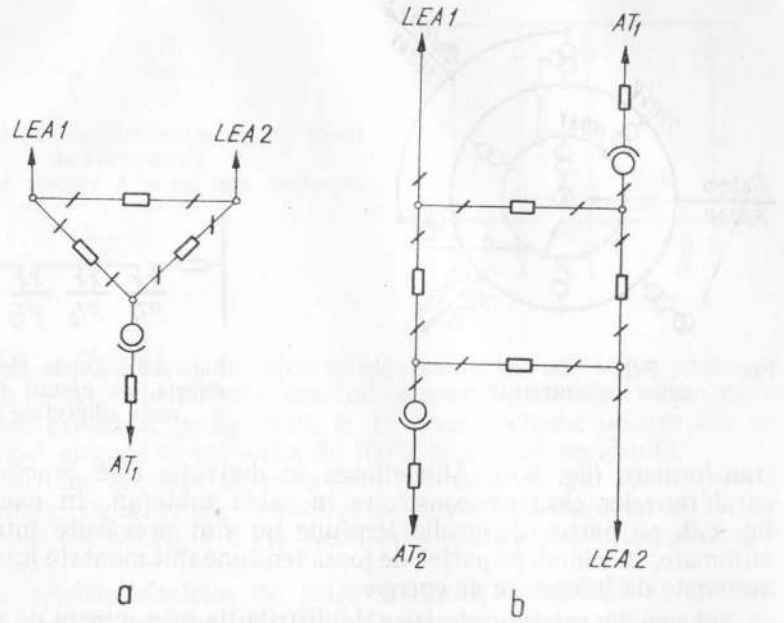


Fig. 8.6. Tipuri de scheme poligonale:
a — triunghi; *b* — patrat.

8.1.3. Tipuri de scheme ale rețelelor electrice

Cele mai complexe scheme ale rețelelor electrice se regăsesc în alimentarea cu energie electrică a marilor orașe, la toate treptele de tensiuni [8.2].

Schemele inelare ale rețelelor de înaltă tensiune sînt utilizate pentru alimentarea cu energie electrică a marilor aglomerări urbane. Într-o configurație geometrizată și idealizată un asemenea tip de schemă este redat în fig. 8.7. Ea poate fi întîlnită ca tip de schemă în modul cum s-a realizat alimentarea cu energie electrică a orașelor Moscova, Berlin, Stokholm, Viena, București, ș.a.

Scheme ale rețelelor electrice de distribuție directă, cu posturi de transformare alimentate în serie (fig. 8.8) se utilizează atunci cînd stațiile de transformare pot fi aduse în centrul de consum. Un caz particular al acestor scheme este acela cu alimentarea în derivație a posturilor de

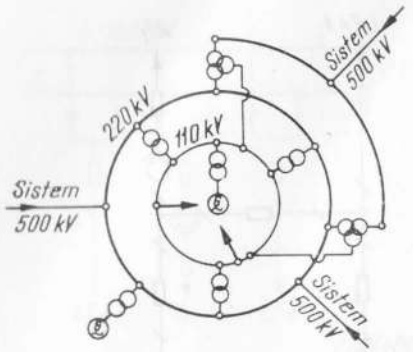


Fig. 8.7. Rețele de alimentare ale marilor aglomerări urbane.

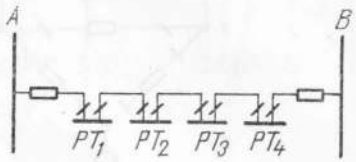


Fig. 8.8. Rețele de distribuție directă, cu posturi de transformare alimentate în serie.

transformare (fig. 8.9). Alimentarea în derivație este practicată și în cazul rețelelor electrice construite în cablu subteran. În exemplul din fig. 8.9. pe partea de medie tensiune nu sînt prevăzute întreruptoare automate, în schimb pe partea de joasă tensiune sînt montate întreruptoare automate de întoarcere de energie.

Scheme ale rețelelor electrice de distribuție prin puncte de alimentare se utilizează atunci cînd stațiile de transformare nu pot fi aduse chiar în centrul de consum. Aceste scheme pot fi de mai multe feluri, funcție de gradul de dezvoltare a rețelelor și de gradul de siguranță dorit.

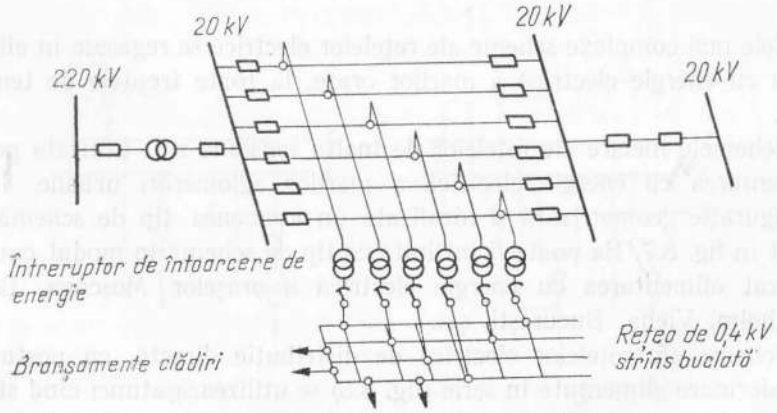


Fig. 8.9. Rețele de distribuție directă cu posturi de transformare alimentate în derivație.

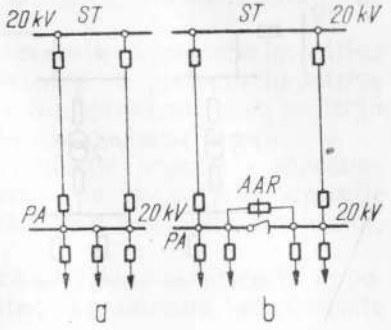


Fig. 8.10. Rețele de distribuție cu un punct de alimentare:
a — cu bară simplă; *b* — cu bară secționată.

În cazul cînd sectorul de rețea este prevăzut cu un singur punct de alimentare (P.A), schema este cea indicată în fig. 8.10, *a*, sau într-o schemă mai evoluată, în fig. 8.10, *b*. În aceste scheme oricare din cei doi fideri pot asigura în proporție de 100% consumul sectorului.

În cazul cînd sectorul de rețea este prevăzut cu mai multe puncte de alimentare, în schemele respective se poate introduce un al treilea fider în diferite scheme (fig. 8.11). Acest fider poate prelua integral sarcina unui alt fider.

Pentru rețelele electrice de joasă tensiune, exceptînd cazul unor alimentări radiale, cele mai des utilizate scheme pentru rețelele buclate sînt: buclate longitudinal (fig. 8.12, *a*), buclate transversal (fig. 8.12, *b*), complex buclate și strîns buclate.

Rețelele electrice de joasă tensiune buclate transversal sau longitudinal, din punctul de vedere al schemei normale, pot funcționa fie radial, fie buclat.

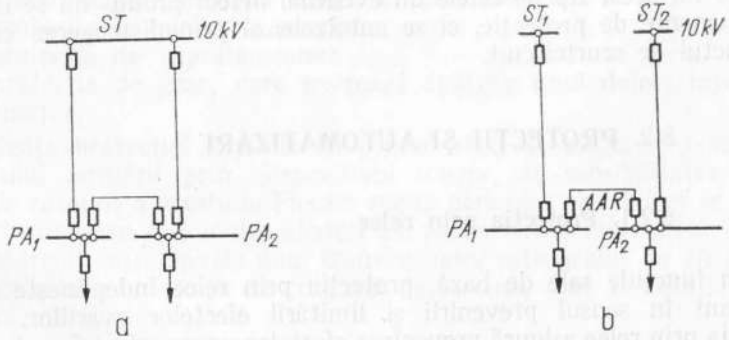


Fig. 8.11. Rețele de distribuție cu două puncte de alimentare:
a — alimentate din aceeași stație de transformare și fider de echilibru;
b — alimentate din stații de transformare distincte și fider cu AAR.

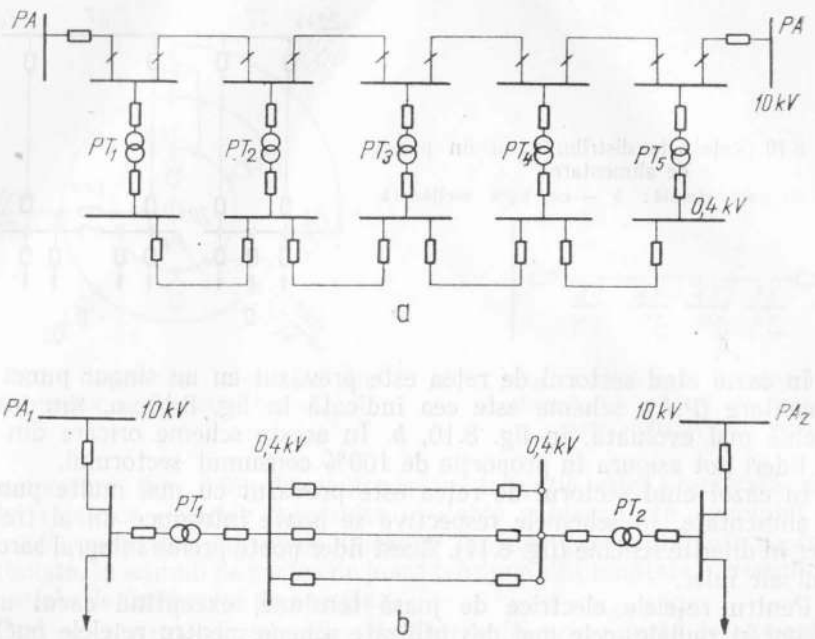


Fig. 8.12. Rețele de distribuție buclate:
a — longitudinal; *b* — transversal.

Rețelele electrice de joasă tensiune complex buclate cuprind atît elementele de buclare longitudinală cît și transversală.

Rețelele electrice de joasă tensiune strîns buclate au fost arătate în fig. 8.9. La acest tip de rețele un eventual defect produs nu se izolează prin elemente de protecție, ci se autoizolează prin distrugerea cablului în punctul de scurtcircuit.

8.2. PROTECȚII ȘI AUTOMATIZĂRI

8.2.1. Protecția prin relee

Prin funcțiile sale de bază, protecția prin relee îndeplinește un rol important în sensul prevenirii și limitării efectelor avariilor. Astfel, protecția prin relee asigură prevenirea efectelor unor regimuri periculoase, sesizarea apariției unui defect, delimitarea zonei cu defect și scoaterea din funcțiune a instalației defecte. În acest sens, pentru fiecare echipament sau element de bază din sistemul energetic, există instalație de protecție corespunzător specializată.

Astfel, de exemplu, generatoarele sînt prevăzute cu protecție împotriva supratensiunilor sau scurtcircuitelor din rețea și cu protecții împotriva defectelor interne (din stator sau din rotor). Sînt prevăzute și cu protecții împotriva supratensiunilor ce pot apare la deconectarea bruscă.

Transformatoarele sînt prevăzute cu protecție împotriva suprasarcinilor sau scurtcircuitelor din rețea. Totodată au instalații de protecție împotriva defectelor interne, din înfășurări, din miez, din comutator, sau din sistemul de răcire.

Liniile electrice aeriene și subterane sînt prevăzute cu protecții împotriva defectelor de toate tipurile obișnuite: suprasarcină, scurtcircuite mono, bi sau trifazate.

În cele ce urmează se fac cîteva precizări cu privire la funcțiile de principiu ale protecțiilor folosite pentru prevenirea sau limitarea efectelor avariilor și pentru localizarea elementelor deteriorate.

● Prima funcție, *sesizarea apariției regimului periculos sau a defectului*, se bazează pe controlul principalilor parametri electrici: curentul de sarcină, tensiunile între faze și față de pămînt. Apariția unui regim periculos sau a unui defect este sesizată prin variația acestor parametri față de anumite mărimi de referință. Astfel se disting:

— protecția maximală, de suprasarcină, care sesizează depășirea curentului admisibil dintr-un element al instalației și are rolul principal de prevenire a unui defect;

— protecția maximală de scurtcircuit, care sesizează apariția unui curent de scurtcircuit într-un element al instalației;

— protecția diferențială, care sesizează un dezechilibru în circulația de curent prin două linii paralele sau printr-un element de trecere;

— protecția homopolară, care sesizează un dezechilibru de curent sau de tensiune prin apariția componentei homopolare;

— protecția de punere la pămînt;

— protecția de supratensiune;

— protecția de gaze, care sesizează apariția unui defect intern în transformator.

Eficiența protecției depinde în primul rînd de alegerea corectă a elementului urmărit prin dispozitivul sesizor, de sensibilitatea și de viteza de răspuns a acestuia. Fiecare regim periculos sau defect se manifestă prin una sau mai multe abateri ale parametrilor instalației. Astfel, un scurtcircuit între spirele unui transformator este urmat de un curent de defect relativ mic față de curentul de sarcină, deci nesesizabil prin protecția maximală.

În schimb poate fi sesizat de o instalație care urmărește diferența dintre curentul ce intră și iese din transformator. De asemenea, un defect

de contact, din interiorul unui transformator, nu va provoca modificări de parametri electrici (curent de sarcină, tensiuni). În schimb poate fi sesizat prin degajările de gaze pe care le provoacă în ulei.

Deci, pentru fiecare element de instalație trebuie găsiți parametri care prezintă modificări substanțiale în cazul unui regim anormal.

● A doua funcție, *delimitarea zonei defecte*, se îndeplinește cu ajutorul elementelor de execuție care deconectează selectiv elementele avariate. Această funcție presupune ca fiecare element principal protejat, să aibe posibilitatea de a fi deconectat din toate direcțiile din care poate fi alimentat cu energie electrică.

Desigur acest lucru nu este posibil pentru fiecare element în parte, ci se asigură numai pentru echipamente sau părți de instalație de mare importanță.

● A treia funcție, *protejarea restului instalației față de efectele avariei*, rezultă din funcția a doua, cu condiția ca viteza de acționare a protecției respective să fie corelată cu necesitățile de protecție a restului instalației. Acest lucru se poate evidenția prin următoarele două exemple:

— protejarea unui transformator față de suprasarcinile provocate în rețeaua de joasă tensiune; protecția maximală de suprasarcină a liniilor de joasă tensiune trebuie să fie astfel temporizată încît să prevină supraîncălzirea transformatorului ce alimentează rețeaua respectivă;

— protejarea elementelor unei stații față de efectele termice ale scurtcircuitului; protecția trebuie să fie astfel temporizată ca stabilitatea termică la scurtcircuit a elementelor stației să nu fie periclitată.

● A patra funcție; *scoaterea de sub tensiune a elementului defect*, are ca scop limitarea avariilor din acesta. Astfel, de exemplu, la un cablu scurtcircuitat, scoaterea sa rapidă de sub tensiune limitează avaria numai la locul respectiv de scurtcircuit și nu permite ca izolația cablului să se deterioreze în continuare.

În acest sens se precizează că efectele termice ale curentului de scurtcircuit pot fi limitate în mod decisiv prin acționare rapidă a protecției.

De asemenea, deconectarea rapidă a curentului de scurtcircuit poate asigura stabilitatea dinamică a sistemului.

8.2.2. Rolul automatizărilor

În acțiunea de limitare a efectelor avariilor, instalațiile de automatizare au un rol important, avînd în vedere că intervenția omului nu poate să asigure nici viteza de acționare impusă de evenimente și nici simultaneitatea necesară în mai multe puncte.

Funcțiile principale preluate de instalațiile de automatizare în limitarea efectelor avariilor sînt:

— automatizări pentru asigurarea stabilității în funcționare;

— automatizări pentru restabilirea automată a alimentării consumatorilor.

Pentru asigurarea stabilității se folosesc:

— reglajul automat al tensiunii (excitației) generatoarelor: prin intervenția rapidă a acestora se asigură cuplul de sincronizare suplimentar necesar în cazurile de șocuri provocate de scurtcircuit;

— sistemele de descărcare automată a sarcinii, care intervin prin deconectarea automată a unei părți din sarcina electrică în cazurile cînd stabilitatea statică este în pericol.

Pentru restabilirea automată a alimentării consumatorilor se folosesc:

— reanclanșarea automată rapidă (RAR), mono sau trifazată a liniilor electrice aeriene;

— anclanșarea automată a rezervei (AAR) pentru transformatoare prin circuite de rezervă;

— pornirea automată a grupurilor electrogene de rezervă.

Aceste automatizări asigură:

— restabilirea rapidă a alimentării consumatorilor în cazul unui defect trecător;

— înlocuirea unui element avariat, dacă există element de rezervă;

— asigurarea alimentării dintr-o sursă de rezervă.

Pentru ca automatizarea alimentării de rezervă să-și îndeplinească corect misiunea, trebuie să asigure:

— sesizarea dispariției tensiunii pe sursa principală;
— verificarea prezenței tensiunii pe sursa de rezervă;
— comanda de anclanșare a sursei de rezervă.

8.3. SISTEME DE COMANDĂ ȘI DE SUPRAVEGHERE CENTRALIZATĂ

În acțiunea de detectare (localizare) a defectelor și de restabilire rapidă a alimentării, un rol important îl au și sistemele de comandă și de supraveghere centralizată.

Funcțiile principale în acest sens sînt următoarele:

— sesizarea perturbațiilor, localizarea elementului avariat și transmiterea informației la punctul central de supraveghere, sub forma unor semnalizări de avarie;

— transmiterea comenzilor de deconectare necesare delimitării și izolării zonei defecte;

— tansmiterea comenzilor de restabilire a alimentării zonei respective.

Elementele principale ale acestor sisteme sînt :

— camerele de comandă cu panouri sinoptice pe care apar simbolic toate elementele controlate și sînt prevăzute cu semnalizări centralizate, selective ;

— sistemul de colectare, transmitere și de prelucrare a informațiilor, care folosește o rețea de fire fizice sau sisteme de transmisiune de înaltă frecvență.

Un element esențial al acestor sisteme este înregistratorul cronologic de evenimente care înregistrează automat orice comutare și semnalizare de avarie, asigurînd astfel un tablou fidel și complet al evenimentelor are au avut loc cu ocazia avariei.

BIBLIOGRAFIE

8.1. *Normativ privind alimentarea cu energie electrică a consumatorilor industriali și similari.* MEE-ODE, 1973.

8.2. Eizenberg, B. L. ș.a. *Rețele electrice urbane* (traducere din limba rusă). Editura tehnică, București, 1963.